



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROPOSTA DE UMA MATRIZ ENERGÉTICA BASEADA EM FONTES 100%
RENOVÁVEIS NO BENIN: AUMENTAR O CONSUMO DE ENERGIA
ELÉTRICA PER CAPITA ATÉ 2050**

Patrick Comlan Mahougnon Ahotondji

Brasília, Julho de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROPOSTA DE UMA MATRIZ ENERGÉTICA BASEADA EM FONTES 100%
RENOVÁVEIS NO BENIN: AUMENTAR O CONSUMO DE ENERGIA
ELÉTRICA PER CAPITA ATÉ 2050**

Patrick Comlan Mahougnon Ahotondji

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Rafael Amaral Shayani, ENE/UnB

Orientador

Prof. Ivan Marques de Toledo Camargo, ENE/UnB

Examinador interno

Prof. Jorge Andrés Cormane Angarita, FGA/UnB

Examinador interno

Dedicatória

*Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe **Sra. Seraphine Jocelyne Agon-noude** e ao meu pai **Sr. Calixte Comlan Ahotondji** que juntos, foram minha base e a minha principal fonte de motivação nessa jornada cujo início se deu 5 anos atrás. O apoio incondicional deles, a confiança e a fé constantemente renovada que eles depositaram em mim foram o principal estímulo durante meu percurso até aqui.*

Patrick Comlan Mahougnon Ahotondji

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela minha vida, por ter me dado a força, a coragem, a determinação necessária para estar terminando esta fase da minha vida e por ter me assistido e ter guiado meus passos entre os inúmeros obstáculos encontrados ao longo do curso.

*Obrigado ao Brasil que foi para mim, uma nação acolhedora e que me permitiu realizar esse sonho meu de me tornar engenheiro eletricista através do Programa **Pec-G**.*

*Agradeço a todos os funcionários do MEC, do **INT-UnB** e do **NEPPE-IL-UnB** que estão envolvidos no Programa Pec-G em especial ao responsável de todos os estudantes Pec-G da UnB, **Rogério Alves de Souza Almeida**, aos meus professores de português, **Lúcia Barbosa**, **Verônica Vinecký**, **Karina Carvalho** e **Fidel Cañas** que me ensinaram tão bem o português durante meus primeiros meses no Brasil.*

Meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram com a minha chegada até aqui, aos meus familiares, meus pais e meus irmãos que sempre me incentivaram e acreditaram em mim.

*Agradeço também a todos os meus caros colegas, amigos que foram grandes companheiros durante o curso e foram também meus grandes apoios nessa jornada. **Andrey Otacílio Oliveira dos Reis**, **Emmanuel Vitor Miranda de Oliveira**, **Gabriel César Veloso de Oliveira** e **Marcelo Gomes Souza**; Obrigado a todos vocês. Juntos, nós enfrentamos muitos desafios e graças a vocês o processo se mostrou mais leve.*

*E por fim, gostaria de expressar minha gratidão à **Universidade de Brasília** e a todos os professores que contribuíram para minha formação, especialmente ao meu orientador, **Rafael Amaral Shayani**, que sempre me deu suporte e ajudou a desenvolver e concluir este trabalho.*

Patrick Comlan Mahougnon Ahotondji

RESUMO

O acesso à energia confiável e acessível é um requisito fundamental para o desenvolvimento socioeconômico e melhoria da qualidade de vida. No entanto, em muitas regiões ao redor do mundo, incluindo o Benin, a questão do acesso limitado à energia continua sendo um desafio significativo. O Benin, um país da África ocidental, enfrenta dificuldades consideráveis em fornecer serviços energéticos adequados à sua população, especialmente em áreas rurais. Atualmente, o Benin possui uma baixa taxa de eletrificação, com uma parcela substancial da população sem acesso à eletricidade. O consumo anual per capita de eletricidade no Benin é significativamente menor em comparação com a média global, evidenciando a grande disparidade no acesso à energia entre o Benin e o restante do mundo. O cidadão beninense médio consome aproximadamente 27 vezes menos eletricidade por ano em comparação com a média global. Essa falta de acesso à energia tem implicações profundas para o desenvolvimento socioeconômico do país. A falta de eletricidade prejudica vários aspectos da vida cotidiana, incluindo educação, saúde e produtividade econômica. Muitas comunidades rurais no Benin enfrentam desafios significativos para acessar serviços básicos, como iluminação, refrigeração e comunicação, que são cruciais para o progresso socioeconômico. Além disso, a forte dependência do Benin em relação aos países vizinhos para suprir suas demandas energéticas agrava ainda mais a questão. O país depende muito da importação de eletricidade, tornando-se vulnerável a flutuações de preços e interrupções no fornecimento. Essa dependência afeta não apenas a segurança energética do país, mas também coloca uma pressão sobre seus recursos financeiros. Enfrentar o desafio do acesso à energia no Benin requer uma abordagem abrangente e sustentável. A transição para uma matriz energética baseada em fontes renováveis oferece uma oportunidade de melhorar o acesso à energia, promover o desenvolvimento sustentável e mitigar os efeitos adversos das emissões de gases de efeito estufa. Ao aproveitar o potencial de energia renovável do país, o Benin pode alcançar autossuficiência energética, reduzir sua dependência de combustíveis fósseis e contribuir para os esforços globais no combate às mudanças climáticas.

Este trabalho então visa propor um mix de fontes de energia renovável para compor uma matriz elétrica 100% renovável no Benin. Ao explorar o potencial das fontes solar, eólica, biomassa e hidrelétrica, este estudo busca estabelecer as bases para um futuro energético sustentável no país. A implementação desse mix de energia renovável não apenas melhorará o acesso à energia, mas também estimulará o crescimento econômico, melhorará os padrões de vida e contribuirá para o desenvolvimento geral do Benin. O método adotado envolve a identificação da quantidade total de energia necessária para elevar o consumo anual per capita de 120 kWh/habitante para a média mundial de 3265 kWh/habitante. Em seguida, é avaliado o potencial de fontes renováveis, como solar, eólica, biomassa e hidrelétrica, e feita a distribuição proporcional da energia a ser gerada por cada fonte. O dimensionamento da energia necessária que cada uma das unidades geradoras precisa gerar para atingir a meta dos 3265 kWh/ano/habitante, a viabilidade técnica e física, os desafios e soluções são discutidos. Por fim, o custo aproximado da implementação desse mix até 2050 é avaliado.

Palavras-chave: acesso à energia, matriz elétrica renovável, energia renovável, desenvolvimento socioeconômico, Benin, transição energética, potencial de fontes renováveis, autossuficiência energética,

crescimento econômico, qualidade de vida.

ABSTRACT

Access to reliable and affordable energy is a fundamental requirement for socioeconomic development and improvement of quality of life. However, in many regions around the world, including Benin, the issue of limited access to energy remains a significant challenge. Benin, a country in West Africa, faces considerable difficulties in providing adequate energy services to its population, especially in rural areas. Currently, Benin has a low electrification rate, with a substantial portion of the population lacking access to electricity. The annual per capita electricity consumption in Benin is significantly lower compared to the global average, highlighting the vast disparity in energy access between Benin and the rest of the world. The average Beninese citizen consumes approximately 27 times less electricity per year compared to the global average. This lack of access to energy has profound implications for the country's socioeconomic development. The absence of electricity hampers various aspects of daily life, including education, healthcare, and economic productivity. Many rural communities in Benin face significant challenges in accessing basic services such as lighting, refrigeration, and communication, which are crucial for socioeconomic progress. Furthermore, Benin's strong dependence on neighboring countries to meet its energy demands further exacerbates the issue. The country relies heavily on electricity imports, making it vulnerable to price fluctuations and supply disruptions. This dependence not only affects the country's energy security but also puts a strain on its financial resources. Addressing the challenge of energy access in Benin requires a comprehensive and sustainable approach. The transition to a renewable energy-based matrix offers an opportunity to improve energy access, promote sustainable development, and mitigate the adverse effects of greenhouse gas emissions. By harnessing the renewable energy potential of the country, Benin can achieve energy self-sufficiency, reduce its dependence on fossil fuels, and contribute to global efforts in combating climate change.

Therefore, this study aims to propose a mix of renewable energy sources for a 100% renewable electricity matrix in Benin. By exploring the potential of solar, wind, biomass, and hydropower sources, this study seeks to establish the foundation for a sustainable energy future in the country. The implementation of this renewable energy mix will not only improve energy access but also stimulate economic growth, enhance living standards, and contribute to the overall development of Benin. The adopted method involves identifying the total amount of energy needed to raise the annual per capita consumption from 120 kWh per person to the global average of 3265 kWh per person. The renewable sources' potential is evaluated, and a proportional distribution of the energy to be generated by each source is determined. The necessary energy generation capacity for each unit is dimensioned to achieve the target of 3265 kWh per year per person, and the technical and physical feasibility, challenges, and solutions are discussed. Finally, the approximate cost of implementing this renewable energy mix until 2050 is assessed.

Keywords: energy access, renewable energy matrix, renewable energy, socio-economic development, Benin, energy transition, potential of renewable sources, energy self-sufficiency, economic growth, life's quality.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1.1	CONTEXTO GLOBAL	1
1.1.2	CONTEXTO AFRICANO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	4
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	O BENIN	8
2.2	MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA	9
2.3	LUZ SOBRE O ESTADO ATUAL DA MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA DO BENIN VS CONJUNTO DOS PAÍSES MEMBROS DA UEMOA	11
2.4	FATOR DE CAPACIDADE	16
2.5	ENERGIA SOLAR	18
2.5.1	A ENERGIA SOLAR NA ÁFRICA	18
2.5.2	SISTEMAS FOTOVOLTAÍCOS	22
2.5.3	ALGUNS CONCEITOS TEÓRICOS FUNDAMENTAIS PARA UM MELHOR DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAÍCO	23
2.6	ENERGIA HIDRELÉTRICA NO MUNDO: PANORAMA GERAL	28
2.6.1	HIDROLOGIA DO BENIN	28
2.6.2	FUNCIONAMENTO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA: DA ÁGUA ATÉ UMA ENERGIA VERDE	30
2.6.3	FORMAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA: AS DIFERENTES FORMAS DE GERAÇÃO	31
2.6.4	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA HIDRELÉTRICA	32
2.7	ENERGIA EÓLICA	35
2.7.1	A ENERGIA EÓLICA NA ÁFRICA E NO BENIN	36
2.7.2	FUNCIONAMENTO DE UM PARQUE EÓLICO	37
2.7.3	TIPOS DE PARQUES EÓLICOS	37
2.7.4	DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	41
2.7.5	POTÊNCIA DISPONÍVEL	42
2.7.6	POTÊNCIA RECUPERADA	42
2.7.7	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA	44
2.8	BIOENERGIA	45
2.8.1	BIOMASSA	46
2.8.2	COMO FUNCIONA A BIOMASSA?	46
2.8.3	A BIOENERGIA NA ÁFRICA	47

2.8.4	COMO FUNCIONAM AS USINAS DE DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS OU USINAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS?	48
2.8.5	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	50
2.9	OS PRINCIPAIS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	51
2.9.1	BATERIAS	53
2.9.2	HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL (BOMBEAMENTO HIDRELÉTRICO)	54
2.9.3	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE AR COMPRIMIDO	56
2.9.4	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO	56
2.9.5	SUPERCAPACITORES	56
2.9.6	VOLANTES DE INÉRCIA (FLYWHEEL)	57
2.9.7	PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.....	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1	MÉTODO ADOTADO	59
3.2	A SITUAÇÃO ATUAL DA MATRIZ ELÉTRICA DO BENIN	60
3.2.1	ALGUNS DADOS IMPORTANTES	62
3.3	O POTENCIAL DE CADA UMA DAS FONTES.....	70
3.3.1	POTENCIAL BIOMASSA	70
3.3.2	POTENCIAL HIDRELÉTRICO	72
3.3.3	POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAÍCA NO BENIN	77
3.3.4	POTENCIAL EM ENERGIA EÓLICA NO BENIN	81
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	88
4.1	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BENIN	88
4.1.1	ENERGIA TOTAL ALVO PARA ATINGIR 3265 KWH PER CAPITA NO BENIN.....	89
4.1.2	DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA A SER GERADA PELO MIX PROPOSTO POR FONTES ..	89
4.2	CALCULO DA ENERGIA DEMANDADA E USINA PARA GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO PARA CADA FONTE COMPONDO O MIX PROPOSTO	90
4.2.1	SISTEMA FOTOVOLTAICO	90
4.2.2	HIDRELÉTRICA	96
4.2.3	ENERGIA EÓLICA: USINA EÓLICA OFFSHORE E ONSHORE	99
4.2.4	BIOENERGIA ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA E LIXOS ORGÂNICOS : USINA DE TRANSFORMAÇÃO DE LIXOS ORGANICOS EM ENERGIA ELÉTRICA.....	102
4.3	PARA O SISTEMA FOTOVOLTAICO	103
4.4	HIDRELÉTRICA	105
4.5	EÓLICA	106
4.6	BIOENERGIA ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA E LIXOS ORGÂNICOS	109
4.7	CARTOGRAFIA DO MAPA DO BENIN ATÉ O HORIZONTE 2050	110
5	CONCLUSÕES.....	113
6	APÊNDICE	116
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

LISTA DE FIGURAS

1.1	Evolução do consumo anual de eletricidade per capita no Benin entre 2010 e 2021 (<i>Fonte: SIE-Benin, 2021</i>).	7
1.2	Objetivo principal do presente trabalho (<i>Fonte: O autor, 2023</i>).	7
2.1	Departamentos e cidades no Benin (<i>Fonte: Artigo [1], página 5</i>).	8
2.2	Matriz Energética Mundial 2021 (<i>Fonte: SEFE, 2021 - [Em francês]</i>).	10
2.3	Matriz Elétrica Mundial 2022 (<i>Fonte: CDE, 2022</i>).	10
2.4	Proporção das energias renováveis na Produção de energia elétrica de 2016 a 2018 (<i>Fonte: Direction Générale des Ressources Énergétiques: Chiffres Clés 2021 Bilan Énergétiques et Indicateurs 2016 à 2020, 2021</i>).	11
2.5	Parte das energias renováveis na Produção de energia elétrica por fonte (<i>Fonte: Direction Générale des Ressources Énergétiques: Chiffres Clés 2021 Bilan Énergétiques et Indicateurs 2016 à 2020, 2021</i>).	12
2.6	Produção de energia por fonte (<i>Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019</i>).	13
2.7	Produção de eletricidade por país membro da UEMOA (<i>Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019</i>).	13
2.8	Estrutura das fontes de produção de eletricidade na UEMOA (<i>Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019</i>).	14
2.9	Fluxo energético do Benin em ktep (2018) (<i>Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019</i>).	15
2.10	Evolução das Emissões de GEE até 2012 (<i>Fonte: European Commission, Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), 2012</i>).	16
2.11	Incidência da radiação solar na superfície.	20
2.12	(a) Os diversos ângulos que existem entre a posição do Sol e o plano horizontal e (b) Ilustração de uma superfície inclinada (módulo fotovoltaico) em relação ao mesmo plano horizontal (<i>Fonte: CRESESB, 2014</i>).	22
2.13	Funcionamento de usina hidrelétrica (<i>Fonte: https://brasilescola.uol.com.br</i>	31
2.14	Capacidade cumulativa de energia eólica na África (<i>Fonte:[2]</i>)	36
2.15	Um parque eólico On-shore (<i>Fonte:https://www.iberdrola.com</i>)	38
2.16	Funcionamento de um parque eólico On-shore (<i>Fonte:https://www.iberdrola.com</i>)	39
2.17	Um parque eólico Off-shore (<i>Fonte:https://www.iberdrola.com</i>)	40
2.18	Funcionamento de um parque eólico Off-shore (<i>Fonte:https://www.iberdrola.com</i>)	41
2.19	Distribuição de probabilidade de ocorrência de velocidades: real VS estimada. (<i>Fonte:Tirado de [3]</i>)	43
2.20	Imagem ilustrativa da criação da bioenergia (<i>Fonte:https://brasilescola.uol.com.br</i>)	45
2.21	Funcionamento de uma usina de transformação de lixo em eletricidade (<i>Fonte:U.S. Energy Information Administration - EIA</i>)	49
2.22	Tecnologias de armazenamento energético. (<i>Fonte:Iberdrola - [4]</i>)	53

2.23	Funcionamento de uma central hidrelétrica de bombeamento (<i>Fonte: Iberdrola - [5]</i>)	55
3.1	Diagrama ilustrativa do método adotado. (<i>Fonte: O autor.</i>).....	60
3.2	Evolução da oferta e demanda de energia elétrica de 1996 a 2012. (<i>Fonte: Adaptado de [6], página 112.</i>)	61
3.3	Evolução da produção de eletricidade em GWh entre 2010 e 2015. (<i>Fonte: Site Autorité de Regulation de l'Électricité ARE</i>).....	62
3.4	Percentual de perdas na rede elétrica de 2010 a 2015. (<i>Fonte: Adaptado de [6]</i>).....	65
3.5	Evolução da taxa de eletrificação nacional entre 2010 e 2021 no Benin. (<i>Fonte: SIE Benin Adaptação atualizada de [6]</i>).....	67
3.6	Evolução da taxa de eletrificação urbana entre 2010 e 2021 no Benin. (<i>Fonte: SIE Benin Adaptação atualizada de [6]</i>).....	67
3.7	Evolução da taxa de eletrificação rural entre 2010 e 2021 no Benin. (<i>Fonte: SIE Benin Adaptação atualizada de [6]</i>).....	68
3.8	Taxa de eletrificação Por Região Vs Benin. (<i>Fonte: SIE Benin (2015) Adaptação atualizada de [6]</i>).	68
3.9	Mapa das sub-bacias com potencial atraente no Benin. (<i>Fonte: GIS Ressources Mapping Adaptação atualizada de [7]</i>).....	73
3.10	Bacias no Benin (<i>Fonte: ECREEE</i>).....	74
3.11	Bacias no Benin (<i>Fonte: [7]</i>).....	76
3.12	Irradiação Horizontal Global no Benin (<i>Fonte: GLOBAL SOLAR ATLAS</i>).....	79
3.13	Produção específica de energia fotovoltaica no Benin (<i>Fonte: GLOBAL SOLAR ATLAS</i>)...	80
3.14	Distribuição do potencial solar no Benin em comparação com o mundo (<i>Fonte: Energy Profile - Benin - IRENA[8]</i>).	81
3.15	Mapa da velocidade do vento no Benin a uma altura de 50 m (<i>Fonte: Global Wind Atlas, 2023</i>).....	82
3.16	Mapa da velocidade do vento no Benin a uma altura de 100 m (<i>Fonte: Global Wind Atlas, 2023</i>).....	83
3.17	Densidade de potência eólica a 80 m (<i>Fonte: [9]</i>).....	84
3.18	Densidade de potência eólica a 100 m (<i>Fonte: [9]</i>).....	85
3.19	Densidade de potência eólica a 120 m (<i>Fonte: [9]</i>).....	85
3.20	Potencial eólico e Velocidades dos ventos a diversas alturas com um fator de cisalhamento $\alpha = 0.1$ (<i>Fonte: [10]</i>).....	86
3.21	Potencial eólico e Velocidades dos ventos a diversas alturas com um fator de cisalhamento $\alpha = 0.4$ (<i>Fonte: [10]</i>).....	87
4.1	Consumo final de Eletricidade no Benin (GWh) (<i>Fonte: SIE-Benin</i>).....	88
4.2	Curva de consumo diário total do país. (<i>Fonte: dados fornecidos pela SBEE</i>).....	92
4.3	Gráfico ilustrando uma visão comparativa das Curvas de Consumo Diário de Energia Elétrica na Região e de Geração(<i>Fonte: O Autor</i>)	93
4.4	Informações sobre a irradiância global a Abomey Calavi no Benin. (<i>Fonte: Global Solar ATLAS</i>).	95
4.5	Índice de irradiação solar em kWh/dia/m ² a Abomey Calavi no Benin. (<i>Fonte: Meteo-Benin</i>).	96

4.6	Potenciais teóricos das sub-bacias existente no Benin. (<i>Fonte: GIS Hydropower Resource Mapping and Climate Change Scenarios for the ECOWAS Region.</i>	98
4.7	Distribuição da energia a ser gerada por fonte eólica por tipo de usina eólica e por região. (<i>Fonte:O autor.</i>).....	100
4.8	Mapa do Benin com o conjunto de usinas que serão implantadas até o horizonte 2050 (<i>Fonte: O autor, 2023.</i>).....	111

LISTA DE TABELAS

2.1	Proporção das energia primárias 2017 (<i>Fonte: ARE, 2020</i>).	11
2.2	Principais Indicadores energéticos do Benin (<i>Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019</i>).	15
3.1	Previsão da demanda de eletricidade.(Adaptado de [11])	62
3.2	Apresentação da Potência Instalada.(Adaptado de [11]).....	63
3.3	Produção e importação de eletricidade. (Adaptado de [11])	63
3.4	Perdas e rendimento na distribuição de energia elétrica no Benin. (<i>Fonte: SBEE, 2018 - Adaptado de [6]</i>).....	65
3.5	Taxa de cobertura de energia elétrica em nível nacional, urbano e rural durante o período de 2010 a 2015. (Adaptado de [11])	69
3.6	Taxa de atendimento. (Adaptado de [11])	69
3.7	Quantidade de resíduos produzidos nos centros urbanos do Benin(PAGIDF 2011).....	71
3.8	Os seis locais selecionados para o desenvolvimento de micro-hidrelétricas pelo estudo ABERME/ACDI. (Adaptado de [12])	75
3.9	Alguns locais selecionados pelo IED após síntese com o GIS hydropower resource mapping. (Adaptado de [6] que foi tirado de [7])	77
4.1	Distribuição da energia total a ser gerada por tipo de Fonte. (<i>Fonte: O autor</i>)	90
4.2	Distribuição da energia total a ser gerada por região. (<i>Fonte: O autor</i>)	91
4.3	Distribuição da energia total a ser gerada por região (Norte e Centro) a partir da hidrelétrica. (<i>Fonte: O autor</i>).....	99
4.4	Tabela recapitulativa de cada fonte proposto e sua respectiva energia a ser gerada anualmente e potência - <i>Fonte: O autor</i>	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia é um fator essencial para o desenvolvimento econômico e social de um país. No entanto, muitos países enfrentam desafios para garantir o acesso universal à eletricidade, especialmente aqueles que dependem de fontes não renováveis e poluentes [1]. O Benin é um desses países, que possui um baixo consumo de energia elétrica per capita e uma alta dependência de combustíveis fósseis importados [2]. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), embora o número de pessoas sem acesso à eletricidade tenha diminuído em todo o mundo de 1,2 bilhão em 2010 para 759 milhões em 2019, a situação energética de muitos países da África Subsaariana e da África como um todo, ainda é crítico; nomeadamente o acesso à energia elétrica. Este é um grande desafio para os países com níveis de desenvolvimento mais baixos, como o Benim, com um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,52 em 2019, segundo a Agência Central de Inteligência (CIA, 2021), onde quase dois terços da população não tinham acesso à eletricidade e com baixa capacidade de geração de energia elétrica em meio ao aumento do consumo de eletricidade (MILLER et al., 2018).

1.1.1 Contexto global

A demanda por energia em todo o mundo está apresentando um crescimento significativo. Impulsionada pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento econômico, principalmente em países emergentes como a China e, em menor medida, a Índia, essa demanda poderá dobrar até 2050, considerando sua demografia. Os principais emergentes, representados pelos BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), bem como os países do Oriente Médio, terão um papel fundamental na formação dos mercados de energia, o que resultará em preços cada vez mais exógenos em relação às nossas próprias políticas.

As energias fósseis, especialmente o petróleo, atualmente fornecem mais de 80% da oferta global de energia. Essa situação reflete a dependência global dessas fontes de energia carbonizada e levanta questões sobre sua sustentabilidade, tanto em termos ambientais quanto no fornecimento de matérias-primas. Embora as reservas globais de energia fóssil pareçam ser abundantes em relação às necessidades futuras, as condições de acesso a essas reservas estão se tornando cada vez mais desafiadoras: os investimentos em infraestrutura necessários para a utilização desses recursos são massivos e o contexto geopolítico é, por natureza, incerto. Além disso, é provável que as restrições climáticas se manifestem antes das restrições geológicas[3].

1.1.2 Contexto africano

Com apenas 14% da população mundial, a África consome apenas 6,1% da energia utilizada no mundo[4]. Na África subsaariana, o consumo médio é 92% menor que a média global e 97% menor que o consumo europeu. Essa disparidade destaca uma divisão energética que separa a África do restante

do mundo, especialmente dos países desenvolvidos.

Além disso, o mix energético na África varia consideravelmente de uma região para outra, embora seja semelhante globalmente. Nas extremidades do continente, o Norte da África e o Sul da África representam 75% do consumo de energia de todo o continente. No Norte da África (Marrocos, Argélia, Tunísia, Líbia, Egito), o gás e o petróleo abundantes são as principais fontes de desenvolvimento e energia consumida. No Sul da África, o consumo é baseado principalmente no carvão, em produtos derivados de sua liquefação e em produtos petrolíferos. O restante da África, "ao redor do equador", que abriga quase três quartos da população do continente, representa apenas um terço do consumo continental.

Uma verdadeira divisão também separa o mundo urbano do mundo rural. Enquanto as maiores cidades africanas têm acesso a fontes convencionais de energia devido à infraestrutura relativamente adequada, as áreas rurais da África Central, Ocidental e Oriental possuem infraestruturas de distribuição praticamente inexistentes. Assim, a biomassa, especialmente a lenha (que representa em média 86% da energia consumida na África), continua sendo a principal fonte de energia. Esse ponto específico destaca um problema recorrente na África: a falta de uma densa rede de distribuição de energia elétrica.

A África produz muita energia, mas consome pouco. Segundo [5], o consumo mundial de energia foi de 14.221 Mtep em 2021. Esse consumo de energia está distribuído geograficamente da seguinte forma:

- 16,96% é consumida pela América do Norte;
- A Ásia consumia 44,37% da energia, sendo que apenas a China representava 25% do consumo mundial;
- Os outros países da Europa fora da OCDE consumiram cerca de 12,56% do total;
- Os países da OCDE tem uma parte de 7,9% no consumo total;
- A América Latina e o Oriente Médio representam 5,66% e 5,34% da demanda, respectivamente;
- O consumo energético da África representa 6,14% do consumo mundial.
- 1,04% do consumo provém dos países do pacífico;

Em termos de consumo total de energia *per capita*, a África possui o menor consumo per capita, com apenas 0,48 tep/ano por habitante, em comparação com a média mundial de 1,23 tep/ano por habitante e 0,90 tep/ano por habitante na América Latina. No que diz respeito à energia elétrica, a África continua sendo a região com o menor consumo, cerca de 636 kWh/ano por habitante, em comparação com cerca de 3500 kWh a nível global, 2.060 kWh por habitante na China e uma média de 1.780 kWh por habitante na América Latina.

• **A energia na África Hoje**

Em 2018, cerca da metade da população total da África (548 milhões de pessoas) não tinha acesso à eletricidade [6] (IEA et al., 2020; Banco Mundial). No mesmo ano, 900 milhões de pessoas no continente africano dependiam para cozinhar do uso tradicional de biomassa, principalmente na forma de carvão

e lenha. A maioria dessas pessoas vive na África subsaariana. Além disso, a atividade das empresas africanas (desde microempresas até agricultura e indústria) é prejudicada pela falta de fornecimento de energia confiável e acessível. A menos que esses desafios sejam enfrentados de maneira coordenada, eles apenas se intensificarão. As estimativas indicam que a população aumentará até 2040 em um bilhão de pessoas na África subsaariana e quase 100 milhões no norte da África [7](Banco Mundial, 2019a). Apenas alguns setores de eletricidade no continente registram emissões de gases de efeito estufa comparáveis às das economias desenvolvidas. De fato, neste ponto, a contribuição total da geração de energia africana para as mudanças climáticas é modesta em comparação com qualquer outra região do mundo. Embora o continente seja o lar de quase 17% da população mundial, as emissões combinadas do uso de combustíveis fósseis na África foram de apenas 3,6% do total global em 2017 [8]. E se retirarmos da equação os quatro países responsáveis pelas maiores emissões absolutas (África do Sul, Egito, Argélia e Nigéria), os demais países africanos responderam por apenas 1% do dióxido de carbono (CO₂) global.

No entanto, o investimento em sistemas elétricos modernos e eficientes é essencial para garantir que a África possa aproveitar o potencial das energias renováveis e evitar uma possível dependência comercial dos combustíveis fósseis. Na África, o caminho a seguir para atingir o objetivo de baixas emissões de carbono não passa apenas pela substituição de fontes de eletricidade poluentes por energias renováveis: é também necessário criar novos sistemas elétricos rentáveis baseados em energias renováveis e em infraestruturas flexíveis e descentralizados (incluindo os sistemas Offgrid), para evitar qualquer cenário em que a demanda crescente seja atendida pelo uso de fontes de combustível fóssil. Nesta área, as forças do mercado podem fazer parte do trabalho, já que o custo das energias renováveis hoje está abaixo da paridade da rede em muitos casos, mas ainda há muito a ser feito. A este propósito, importa sublinhar que, embora África tenha contribuído pouco para as emissões globais de CO₂, estará entre os continentes mais afetados pelas alterações climáticas.

Desta forma, é crucial que cada país da África adote medidas adequadas para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e adaptar-se a eles. Isso inclui investir em energia renovável, proteger as florestas e outros recursos naturais, fortalecer a resiliência das comunidades vulneráveis e promover uma abordagem integrada e colaborativa para enfrentar os desafios climáticos.

Somente assim, a África poderá garantir um futuro sustentável para suas populações e contribuir para o esforço global para limitar o aquecimento global e proteger o planeta para as gerações futuras.

Na perspectiva de estimular o comprometimento dos países no combate para mitigar os problemas das mudanças climáticas, várias iniciativas e acordos foram tomadas a nível mundial como por exemplo:

- **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**

São objetivos estabelecidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 2015 que são um conjunto de 17 objetivos que estabelecem o "roteiro para alcançar um futuro melhor e mais sustentável para todos". Essas metas fazem parte da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, com a intenção de alcançá-las até 2030. Embora sejam amplas, essas metas se desdobram em metas mais detalhadas, com indicadores para ajudar a monitorar o progresso. Os seguintes objetivos são particularmente relevantes para este estudo: ODS 7 – Energia acessível e limpa, ODS 8 – Trabalho decente e crescimento econômico, ODS 9 – Indústria, inovação e infraestrutura e ODS 13 – Contramedidas. O ODS 7 está particularmente

bem alinhado com os objetivos deste trabalho, pois exige acesso universal à energia sustentável até 2030.

- **O Acordo de Paris**

Ele foi assinado em 12 de dezembro de 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) e realizada em Paris. O objetivo central deste acordo é fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas, mantendo o aumento da temperatura global bem abaixo de 2 °C (e idealmente 1,5 °C) em comparação com a era pré-industrial. Além disso, as partes visam aumentar a capacidade dos países para lidar com os impactos das mudanças climáticas.

Este acordo é o motivo pelo qual cada país signatário se compromete oficialmente através das Contribuições Nacionalmente Determinadas (do inglês NDCs).

- **Agenda 2063**

A Agenda 2063 é o plano e a folha de rota para transformar a África numa potência global do futuro. Inclui um conjunto de iniciativas implementadas pela União Africana. A agenda proposta em 2013, que define o rumo para os próximos 50 anos, foi formalmente adotada na Assembleia Ordinária de Chefes de Estado e de Governo da União Africana em 2015. Entre os principais objetivos da agenda está o apoio à sustentabilidade ambiental e às economias e comunidades resilientes. As áreas prioritárias específicas incluem a gestão sustentável dos recursos naturais, padrões de consumo e produção, bem como a resiliência climática e o apoio às energias renováveis.

- **A importância da transição energética na África para alcançar os objetivos do Acordo de Paris**

Até o ano de 2050 é estimado que a demanda por eletricidade irá aumentar muito em relação ao consumo atual e como podem ocorrer possíveis reduções das reservas de combustíveis fósseis e principalmente, a busca cada vez mais necessária da sustentabilidade, um espaço cada vez maior se abre para a implementação de fontes renováveis de geração de energia elétrica.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Em toda a área do Benin, existem recursos energéticos ricos e diversificados, principalmente aqueles que não são baseados em carbono. As fontes de energia renováveis como o sol, a energia geotérmica, os rios e o vento são ainda muito pouco exploradas enquanto a biomassa é alvo de um consumo muito elevado a nível local e na sua forma primária, pressionando assim as reservas madeireiras do país. O consumo de energias naturais sem investir na regeneração dos estoques contribui muitas vezes para a degradação do meio ambiente. O baixo consumo de energia é simultaneamente um sintoma de pobreza e um obstáculo à melhoria econômica e social: a insuficiência e o custo da energia penalizam não somente a indústria e os transportes mas também todas as actividades. Na sua tese de doutorado em economia, [9](Sinsin, 2017, p.

39) utilizando três (03) métodos nomeadamente o método de Engle e Granger, o método de Johansen e o ARDL para determinar as relações entre o crescimento econômico e o produto interno bruto do produto, Sinsin concluiu que para o período de 1980 a 2013:

“Que existe uma relação de cointegração entre o consumo de energia elétrica e o PIB. Graças às ferramentas econométricas amplamente desenvolvidas na revisão da literatura, ele verificou que existe uma relação de cointegração na sua análise bivariada. Além disso, ele verificou que existe no sentido de Granger uma causalidade unidirecional entre o crescimento econômico e o consumo de energia elétrica. Isso implica que quanto mais energia estiver disponível, melhor a economia do país terá um crescimento sustentado.”

No caso do Benin, sendo que são os grupos familiares que consomem maiores quantidades de energia elétrica, a sua indisponibilidade tem graves repercussões nas suas actividades geradoras de rendimento (microempresas), na sua qualidade de vida e na sua emancipação (capacidade de inovar e desenvolver projetos que requerem aparelhos elétricos), ou seja, globalmente o seu desenvolvimento humano. No entanto, o baixo consumo de energia anda de mãos dadas com a grande diversidade de energias utilizadas, dependendo do contexto geográfico. As comunidades beninenses embora consumam baixas quantidades de energia em comparação com outros países desenvolvidos, possuem uma imensa variedade de energias renováveis em seu território. O país continua pobre, embora os fatores de progresso estejam ao seu alcance. A definição de uma rota de desenvolvimento para o continente africano implica, portanto, a resolução da equação energética, e é nesta dinâmica que este estudo se insere; não para resolver milagrosamente os contratempos de vários anos de má organização, mas para fornecer abordagens para solucionar a situação atual.

O país enfrenta vários desafios no setor energético. Apesar de ter um potencial significativo de recursos renováveis, como a energia solar, hidrelétrica, bioenergia e eólica, o país ainda depende em grande parte de combustíveis fósseis importados para atender à sua demanda de eletricidade. Além disso, o acesso à eletricidade é limitado, especialmente nas áreas rurais, onde apenas cerca de 17,2% da população tem acesso à rede elétrica [10]. Segundo os dados de 2018 encontrados no documento Informativo do SIE UEMOA, o consumo anual per capita de eletricidade no Benin é um dos mais baixos do mundo, cerca de 120,6 kWh/ano¹ [11] [12], enquanto a média mundial é de cerca de 3265 kWh/ano² [12].

Diante desse cenário, é urgente e necessário buscar alternativas para diversificar a matriz energética do Benin de uma forma mais sustentável com o intuito de aumentar a sua segurança energética. Uma das possíveis soluções é a transição para uma matriz 100% renovável, que aproveite o potencial das fontes locais e abundantes de energia limpa e sustentável. Essa transição traria benefícios econômicos, sociais e ambientais para o país, como a redução da dependência externa, a criação de empregos, a melhoria da qualidade de vida e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

O problema de pesquisa que motiva este estudo então gira em torno de como elaborar uma proposta de uma matriz energética 100% renovável para o Benin que seja tecnicamente viável, economicamente acessível e socialmente aceitável? Para responder a essa questão, é preciso considerar os seguintes aspectos:

¹Dados de 2018 encontrados tanto no documento Informativo do SIE UEMOA quanto no relatório completo da IEA sobre as estatísticas energéticas mundiais de 2021

²Valor encontrado no relatório completo da International Energy Agency, Página 61

- A situação atual da matriz energética do Benin, que é baseada principalmente em combustíveis fósseis importados e em biomassa tradicional, com baixa participação de fontes renováveis como solar, eólica e hidrelétrica.
- Os benefícios ambientais, econômicos e sociais de uma transição para uma matriz energética 100% renovável, que poderia reduzir as emissões de gases de efeito estufa, aumentar a segurança energética, gerar empregos e renda, melhorar a qualidade de vida e contribuir para o desenvolvimento sustentável do país.
- O potencial que apresenta cada uma das fontes a serem consideradas na proposta.
- Os desafios técnicos, financeiros e institucionais para implementar uma matriz energética 100% renovável no Benin, que envolvem a necessidade de ampliar a capacidade de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica renovável, de diversificar as fontes e as tecnologias disponíveis, de reduzir os custos e os subsídios, de atrair investimentos privados e internacionais, de fortalecer o marco regulatório e a governança do setor energético, e de promover a participação e a inclusão social dos diferentes atores envolvidos.

Assim, a proposta de uma matriz energética 100% renovável para o Benin deve levar em consideração esses aspectos e buscar soluções integradas e inovadoras que possam atender às demandas energéticas do país de forma eficiente, limpa e equitativa.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho visa propor um mix energético³ 100% renovável suscetível de permitir o suprimento do país em termo de energia elétrica e induzir o aumento significativo do consumo anual per capita do país (cerca de 120.6 kWh/ano) para a média mundial (cerca de 3265 kWh/ano) até o horizonte 2050 como mostram respectivamente as figuras 1.1 e 1.2 considerando os aspectos técnicos, econômicos e ambientais envolvidos

³No caso deste trabalho, a energia solar, a hidrelétrica, a energia eólica e a biomassa são as fontes de energia limpa consideradas na composição deste mix.

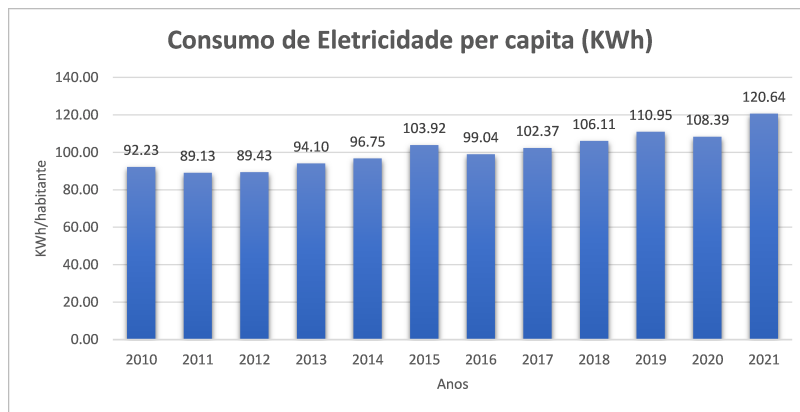


Figura 1.1: Evolução do consumo anual de elétrica per capita no Benin entre 2010 e 2021 (*Fonte: SIE-Benin, 2021*).

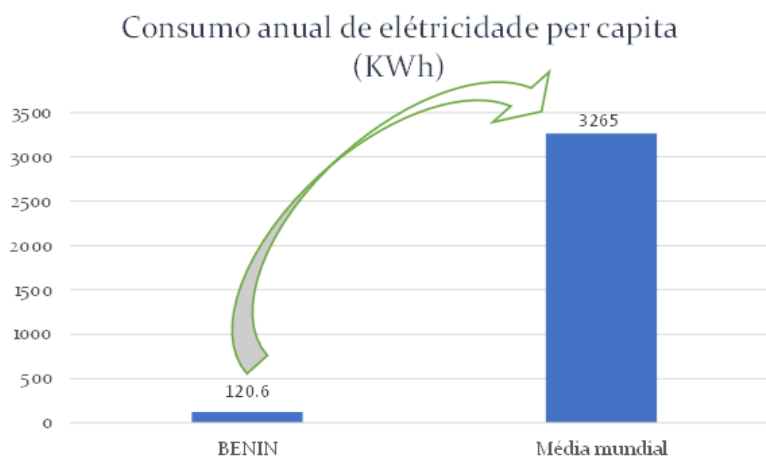


Figura 1.2: Objetivo principal do presente trabalho (*Fonte: O autor, 2023*).

Para isso, será feito uma análise panorâmica da situação energética atual no país, uma análise do potencial das fontes renováveis disponíveis com o intuito de propor uma modelagem de cenários futuros para atender à demanda em energia elétrica do país por meio de um mix de fontes renováveis a saber: a energia solar, a hidrelétrica, a bioenergia e a eólica e também assegurar-se que a energia gerada por este mix de fonte possa proporcionar o aumento do consumo anual per capita em energia elétrica da população para a média mundial até o horizonte 2050. O suprimento da demanda em energia elétrica do país até o horizonte 2050 acontecerá de forma progressiva com a implementação gradativa dos diversos projetos governamentais de exploração dos recursos naturais do país susceptíveis de gerar energia elétrica. Esses projetos serão anexados no final deste trabalho como apêndice. O trabalho pretende contribuir para o debate sobre as alternativas energéticas para o Benin e para a região da África Ocidental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O BENIN

O Benin, oficialmente República do Benin, é um país da África Ocidental, com uma área de 114.763 km² e se estende por 700 km, desde o rio Níger, ao norte, até a costa atlântica, ao sul. Em 2016, o Benin tinha uma população de 10.741.458 habitantes e atualmente tem cerca de 12.996.895 habitantes. O país é subdividido em 12 departamentos e possui 77 municípios (Vers Figura 2.1 além de ser membro da Comunidade Econômica dos Estados da África Ocidental (CEDEAO) e faz fronteira com Togo a oeste, Nigéria a leste, Níger a nordeste e Burkina Faso a noroeste.

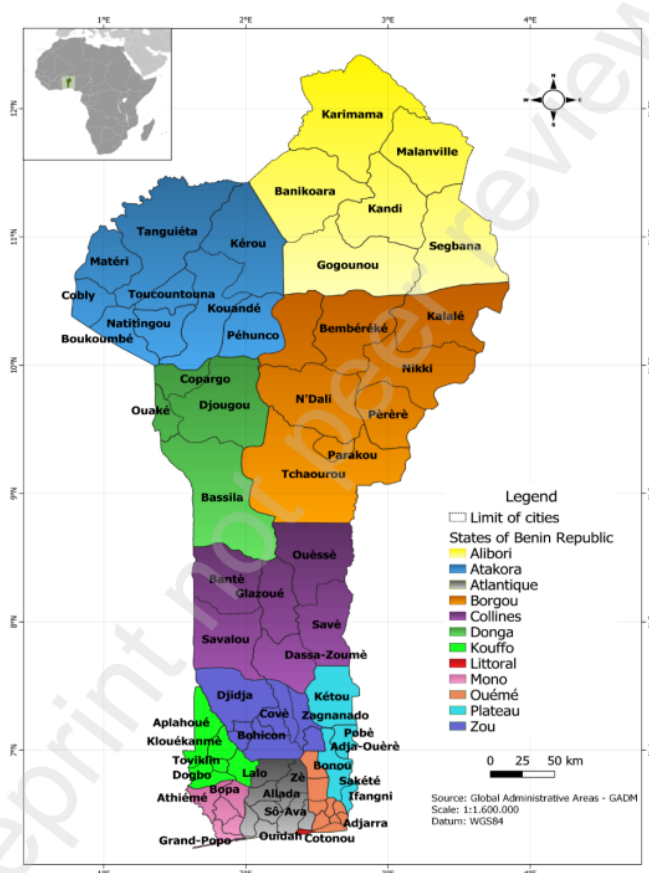


Figura 2.1: Departamentos e cidades no Benin (Fonte: Artigo [1], página 5).

O Benin alcançou plena independência em 1º de agosto de 1960, sob o nome de República do Daomé. O poder foi transferido ao presidente Hubert Koutoukou Maga pelo ministro de Estado francês Louis Jacquinot. Em 1972, o oficial Mathieu Kérékou assumiu o poder: ele adotou o marxismo-leninismo como ideologia oficial do governo em 1974 e renomeou o país como República Popular do Benin em 1975. No final da década de 1980, os conflitos com o Partido Comunista do Benin (ex-Partido Comunista do Daomé) e as graves dificuldades econômicas levaram ao fim do regime: o Benin iniciou um processo de

transição democrática e, em 1990, adotou uma nova Constituição. A transição democrática foi liderada por Nicéphore Soglo, ex-diretor para a África do Banco Mundial. O nome "Benin" foi mantido, e o país passou a ser chamado simplesmente de República do Benin. Mathieu Kérékou, derrotado nas eleições por Nicéphore Soglo em 1991, deixou o poder. Ele voltou democraticamente pelo voto em 1996 e não restaurou a ditadura. Ele governou o país até 2006.

A capital oficial é Porto-Novo (chamada de Hogbonou pelos Goun e Adjatchè pelos Iorubás), sendo Cotonou a capital econômica.

O francês é a língua oficial do Benin e a moeda é o franco CFA. O regime político do Benin é presidencialista e o atual presidente da República é o empresário Patrice Talon, que sucedeu Boni Yayi nas eleições de março de 2016. O Benin é membro de várias organizações internacionais, incluindo a Organização Internacional da Francofonia e a Organização para a Cooperação Islâmica[13].

2.2 MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA

Uma **matriz energética** é o conjunto de fontes de energia utilizadas para atender a demanda em energia da sociedade [14]. As fontes de energia podem ser renováveis e não renováveis. A matriz energética mundial é composta, principalmente, por fontes não renováveis, como o carvão, petróleo e gás natural, que são responsáveis pela maior parte das emissões de gases de efeito estufa (GEE). De acordo com os dados de 2019 da IEA [15], a matriz energética mundial se compõe apenas com cerca de 15% de fontes renováveis, como solar, eólica, geotérmica, hídrica e biomassa. As energias renováveis provêm de recursos naturais, tal como água, vento e sol, e podem ser reabastecidos, ou renovados, de forma mais ou menos contínua e rápida. Além disso, são pouco poluentes. As energias não renováveis têm origem na queima de combustíveis fósseis, que demoram milhões de anos para serem formados. São sinônimo de energia suja, pois são altamente poluentes.

Uma matriz energética 100% renovável é aquela que utiliza apenas fontes de energia que não se esgotam e que não emitem gases de efeito estufa. Para definir uma matriz energética 100% renovável, é preciso considerar alguns critérios que serão abordados mais adiante neste documento, tais como:

1. A disponibilidade dos recursos naturais no país ou na região;
2. A viabilidade técnica, econômica e social da implantação e da manutenção das fontes de energia;
3. A eficiência e a confiabilidade das tecnologias envolvidas na geração e na distribuição da energia;
4. O impacto ambiental e os benefícios para o desenvolvimento sustentável.

Portanto, uma matriz energética 100% renovável depende de um planejamento estratégico que leve em conta as características e as necessidades de cada localidade. Não há uma única solução válida para todos os casos, mas sim uma diversidade de possibilidades que podem ser combinadas de forma integrada e complementar.

De acordo com os dados de 2021 da SEFE Energy, a matriz energética global é predominantemente

constituída por fontes não-renováveis, representando apenas 15,46% de fontes renováveis (incluindo cerca de 2% de outras fontes renováveis como a geotérmica) conforme ilustrado na Figura 2.2.

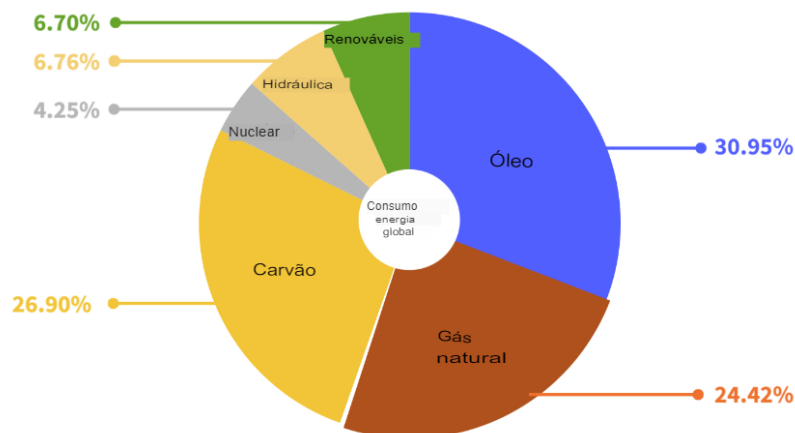


Figura 2.2: Matriz Energética Mundial 2021 (Fonte: SEFE, 2021 - [Em francês]).

A **matriz elétrica** é o conjunto de fontes de energia usadas exclusivamente para a geração de eletricidade em uma região ou país. De acordo com dados revelados no [site](#)¹ da CDE², a participação de fontes renováveis na matriz elétrica mundial (Figura 2.3) é maior em comparação à participação das mesmas na matriz energética mundial, representando 32,9%. Essas fontes incluem energia solar, eólica, geotérmica, maré, biomassa, hídrica, entre outras..

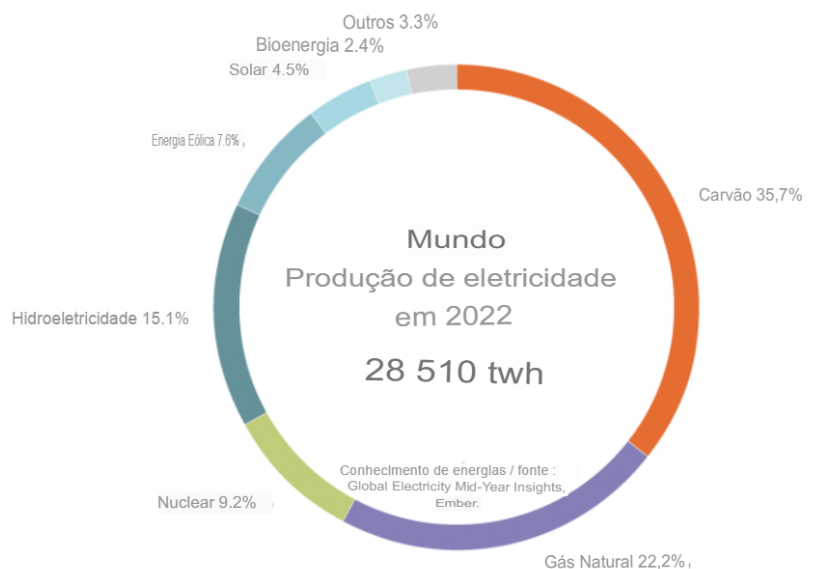


Figura 2.3: Matriz Elétrica Mundial 2022 (Fonte: CDE, 2022).

¹ *Connaissance des énergies* é um site francês informativo que tem como objetivo de promover o conhecimento sobre energias entre o público em geral, nos esforçamos para redigir, selecionar e divulgar conteúdos relevantes sobre energias e suas diversas temáticas, com o intuito de fornecer educação e acesso ao maior número possível de pessoas.

² *Connaissance des énergies*

2.3 LUZ SOBRE O ESTADO ATUAL DA MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA DO BENIN VS CONJUNTO DOS PAÍSES MEMBROS DA UEMOA

De acordo com os dados do Sistema de Informação Energética do Benin (SIE-Benin) usados no documento informativo elaborado pela Autoridade Regulatória de Eletricidade (ARE), Regulador do Benin [16], o fornecimento líquido de energia no Benin em 2017 foi de 5.025,9 ktep, ou 58.451.217 MWh. As diferentes fontes de energia primária utilizadas para o efeito e a sua contribuição são as seguintes: A Biomassa que contribui com 53,95%, o Petróleo com 43,08% e o Gás natural + a hidrelétrica* ³ com cerca de 2,97% até 2017. A matriz energética do Benin é então predominantemente composto da Biomassa (cerca de 53,95%) (Figura 2.1).

Tabela 2.1: Proporção das energia primárias 2017 (Fonte: ARE, 2020).

Energia Primária	Quantidade		Proporção
	Em ktep	Em MWh	
Biomassa	2711.5	31534.745	53.95%
Petróleo	2165.2	25181.276	43.08%
Gás Natura + hidro*	149.2	1735.196	2.97%
TOTAL	5025.9	58451.217	100%

Quanto à participação das fontes de energia renovável na produção de energia elétrica, teve uma grande flutuação como indica a Figura 2.4 com uma queda expressiva de cerca de 21,44% de 2019 a 2020 [17].

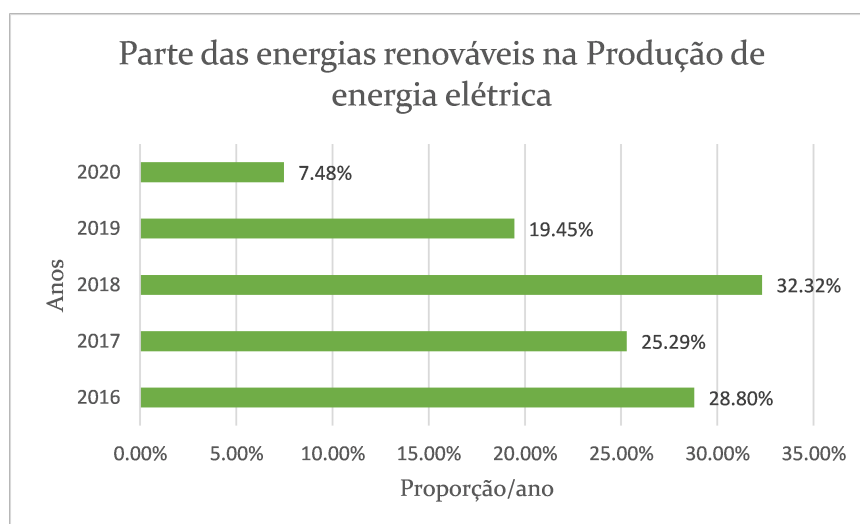


Figura 2.4: Proporção das energias renováveis na Produção de energia elétrica de 2016 a 2018 (Fonte: Direction Générale des Ressources Énergétiques: *Chiffres Clés 2021 Bilan Énergétiques et Indicateurs 2016 à 2020, 2021*).

³Valor usado para a produção de energia elétrica importada e produzida no Benin

No total dessa participação das energias renováveis na produção de eletricidade, segue a contribuição de cada fonte (Solar e Hidrelétrica) na Figura 2.5 a seguir:

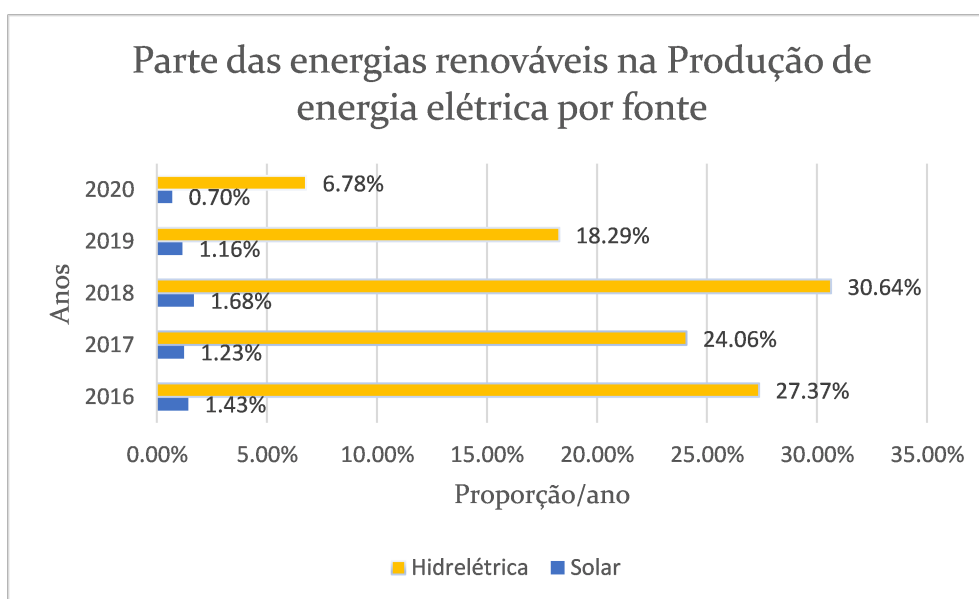


Figura 2.5: Parte das energias renováveis na Produção de energia elétrica por fonte (Fonte: Direction Générale des Ressources Énergétiques: *Chiffres Clés 2021 Bilan Énergétiques et Indicateurs 2016 à 2020, 2021*).

A figura acima evidência o quão baixo é o aproveitamento e uso do solar na Produção de energia elétrica no Benin.

Segundo a PONADER⁴ [18] redigida pelo Ministério de Energia do Benin, o índice de acesso à eletricidade, de acordo com os dados de 2015, é estimado em 33,18% em nível nacional (8,5% em áreas rurais e 61,19% em áreas urbanas) e aumenta em média 7,7% ao ano.

A situação energética da UEMOA⁵ caracteriza-se por uma forte predominância da energia de biomassa, que representa 84% de toda a produção energética da UEMOA; seguido pelo petróleo bruto (9%), gás natural (6%) e hidroeletricidade (1%). O carvão mineral e a energia solar fotovoltaica juntos representam menos de 1% da produção total de energia do espaço oeste africano [11].

O Benin é responsável por 9% da produção de energia na UEMOA. A biomassa responde por mais de 50% da produção de energia do país. A hidroeletricidade e a energia solar fotovoltaica representam menos de 1% da produção própria de energia do país. Entre os 8 países da UEMOA, o Benin é um dos com a menor produção de eletricidade (1% de toda a produção de eletricidade da UEMOA em 2018) como mostra a figura 2.6.

⁴Política Nacional de Desenvolvimento de Energias Renováveis

⁵União Econômica e Monetária do Oeste Africano

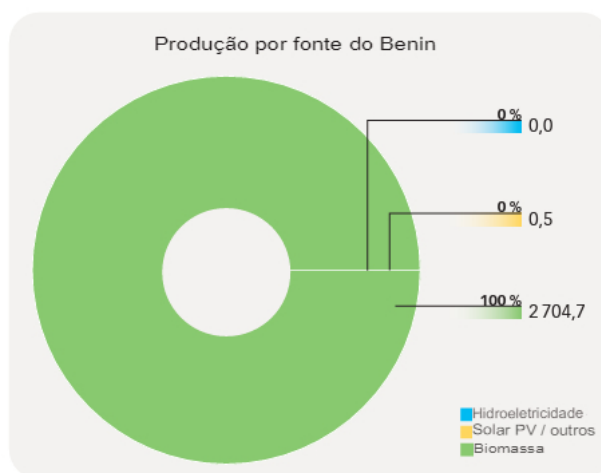


Figura 2.6: Produção de energia por fonte (*Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019*).

Em 2018, foram produzidos 21.148 GWh na área da UEMOA, incluindo 222 GWh pelo Benin ver figura 2.7. Na UEMOA, a eletricidade é gerada principalmente a partir de produtos petrolíferos (38%), gás natural (35%) e hidroeletricidade (21%). O carvão mineral e a energia solar fotovoltaica representam apenas 3% e 2% da produção de eletricidade do espaço, respetivamente (figura 2.8).

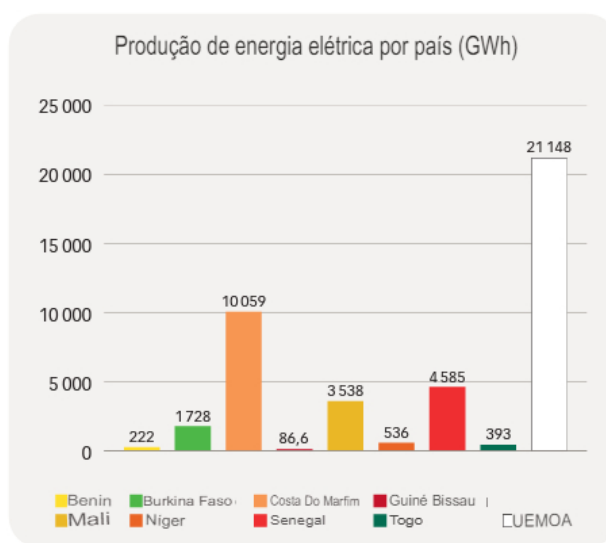


Figura 2.7: Produção de eletricidade por país membro da UEMOA (*Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019*).

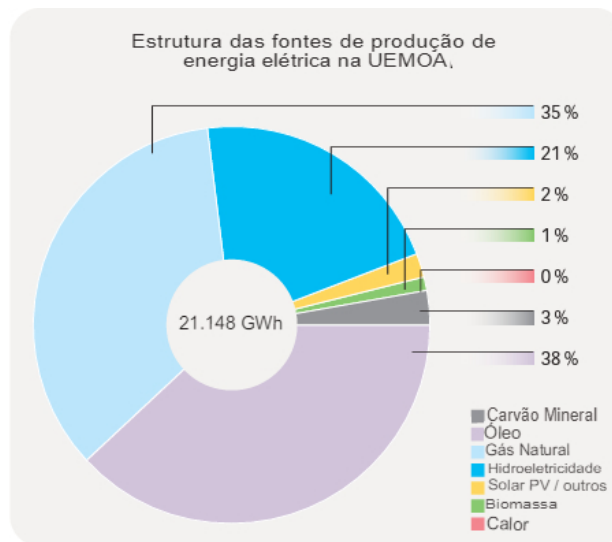


Figura 2.8: Estrutura das fontes de produção de eletricidade na UEMOA (*Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019*).

Uma observação interessante é que a biomassa tem uma contribuição bastante marginal para a geração de eletricidade nos estados membros da UEMOA, particularmente em unidades de eletricidade autogeradas. Cerca de 1% da eletricidade produzida na UEMOA em 2018 é obtida a partir de energia de biomassa. Isto é, embora a biomassa seja massivamente usada na sua forma primária pela população, de toda a produção de eletricidade da UEMOA, somente 1% é obtida a partir da Biomassa. Isso traduz o pouco aproveitamento da Biomassa para produção de energia elétrica nos países membro da UEMOA.

O Benin faz parte dos países da UEMOA (União Econômica e Monetária da África Ocidental) com a menor produção de eletricidade (1% de toda a produção de eletricidade da UEMOA em 2018).

A taxa de eletrificação rural passou de 3,4% em 2010 para 6,3% em 2015 [19]. No mesmo período, a taxa de cobertura nas áreas rurais passou de 12,7% para 29,3% em 2015.

A tabela 2.2 a seguir mostra alguns dos principais indicadores energéticos do país no período de 2010 a 2018.

Tabela 2.2: Principais Indicadores energéticos do Benin (*Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019*).

	Principais indicadores energéticos no Bénin									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Aumento médio anual 2010-2018
População (millions)	9.1	9.4	9.7	10	10.3	10.6	10.9	11.2	11.5	2.90%
PIB (\$ US de 2010)	5.9	6.1	6.3	6.8	7.2	7.6	8	13.8	14.7	12.20%
PIB por habitante (\$ US de 2010)	645	643	653	677	702	716	731	1234	1281	8.90%
Produção de energia (ktep)	1965	2023	2081	2341	2406	2478	2554	2618	2705	4.10%
Importação net de energia (ktep)	1811	1607	1554	1646	1625	1881	2143	2306	2556	4.40%
Fornecimento total em energia Primária (ktep)	3614	3616	3562	3935	4057	4281	4729	4928	5242	4.80%
Consumo de energia elétrica (GWh)	842	840	869	942	996	1100	1078	1145	1200	4.80%
Consumo de eletricidade por habitante (kWh)	92	89	89	94	97	104	99	102	106	1.80%
Taxa de dependência energética	0.46	0.44	0.42	0.41	0.41	0.42	0.46	0.47	0.48	0.70%
Taxa de dependência elétrica	89%	93%	89%	92%	85%	76%	80%	77%	85%	-0.60%

A figura 2.9 a seguir mostra o fluxo energético do Benin em 2018:

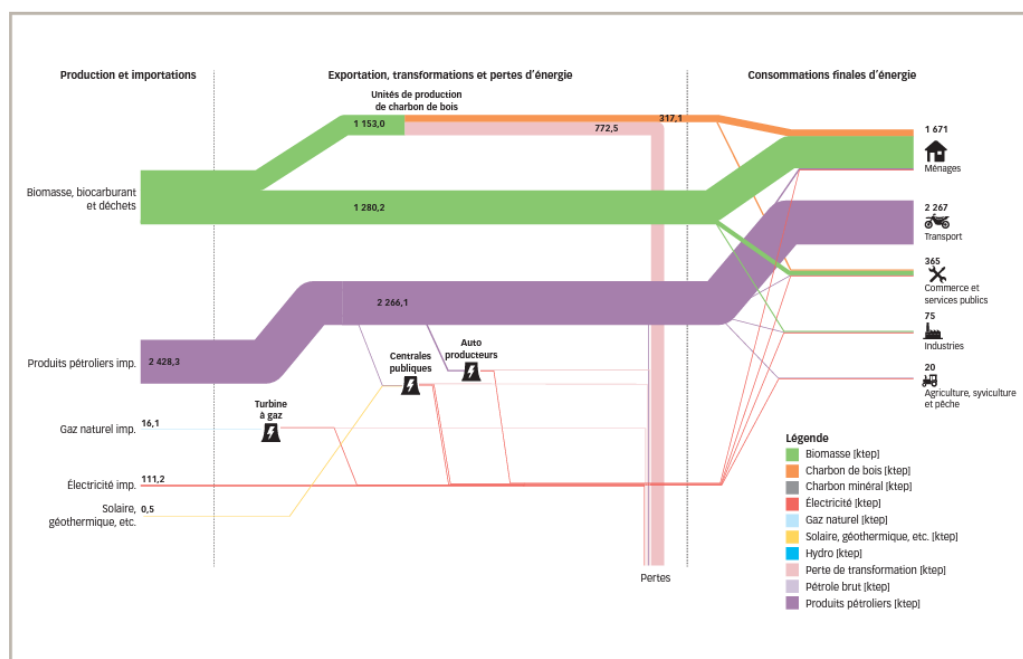


Figura 2.9: Fluxo energético do Benin em ktep (2018) (*Fonte: Sistema de Informação Energética dos Estados Membros da UEMOA, sie.uemoa.int, 2019*).

Embora a Biomassa tenha uma maior participação na matriz energética Beninense, há emissão de GEE devido à geração de energia ainda é muito grande, segundo [20] da European Commission, a evolução das emissões de GEE cresceu bastante entre 1990 e 2021 como mostra a figura 2.10. Por este motivo, para que seja possível reduzir a zero as emissões de GEE até 2050, grandes mudanças na composição da matriz energética e elétrica se farão necessárias.

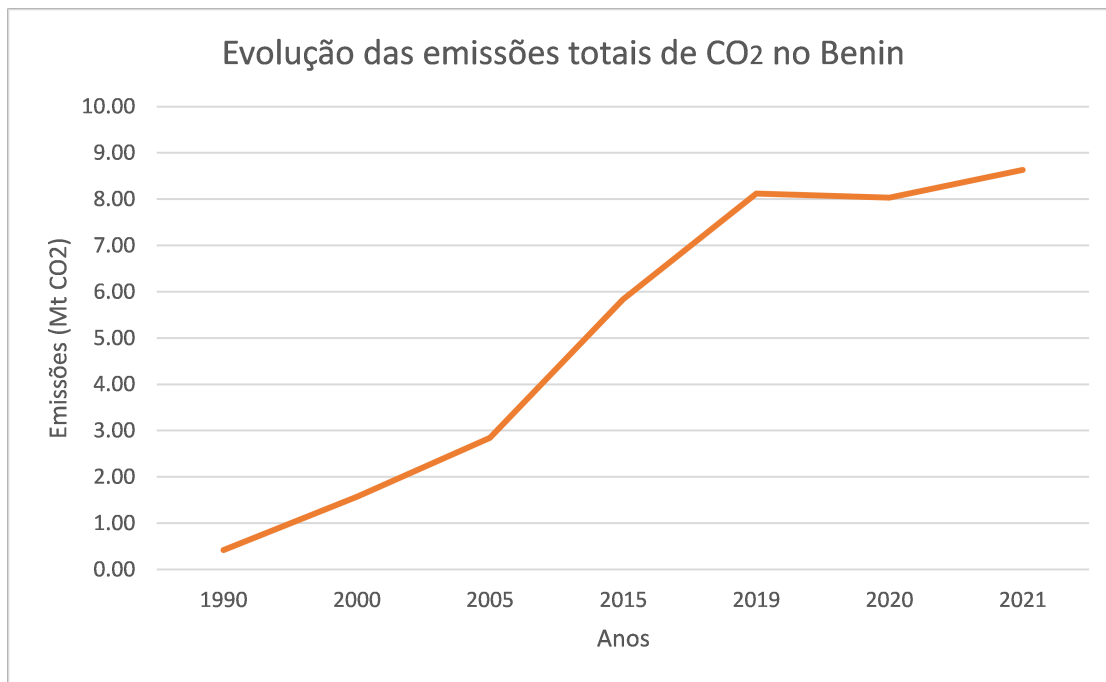


Figura 2.10: Evolução das Emissões de GEE até 2012 (Fonte: *European Commission, Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), 2012*).

Um dos conceitos mais importante deste trabalho é o do Fator de capacidade (FC).

2.4 FATOR DE CAPACIDADE

O fator de capacidade é um importante parâmetro para os estudos de viabilidade econômica de projetos de dimensionamento de qualquer usina de geração de energia elétrica e para o planejamento da expansão da geração de longo prazo. Este dado é função das características técnicas de uma usina. [21].

Para entendermos adequadamente o conceito de Fator de capacidade é de grande importância ter um entendimento claro de três outros conceitos que são diretamente associados ao conceito de Fator de Capacidade a saber a **Potência**, a **Energia** e a **Tempo**.

1. A Potência

Segundo o [22] da *energes*, a capacidade instalada ou potência elétrica de uma usina está diretamente relacionada ao seu tamanho, medida em Watts. No entanto, é essencial compreender que a capacidade instalada de uma usina não representa a quantidade de energia que ela fornece constantemente. Assim, é necessário considerar que a capacidade instalada de um projeto de geração de energia é um indicador de quanta energia o sistema pode fornecer em condições ideais em um determinado momento.

Para energia fotovoltaica a “potência pico” é popularmente conhecida como a potência total dos

2. A Energia

Inicialmente, é importante destacar que a energia é uma grandeza que está relacionada com a potência produzida durante um determinado período de tempo. Esse período de tempo pode variar, sendo expresso em horas, minutos ou segundos.

A unidade de medida da energia, por sua vez, é dada por Watts multiplicado pelo tempo, sendo comumente representada em Watt-hora, especialmente quando o assunto é energia elétrica. É importante ressaltar que, em projetos de geração de energia, os valores de energia dos sistemas costumam ser expressos em unidades como kWh, MWh ou GWh.

Entre os conceitos fundamentais, o conceito de energia é o mais essencial, pois é a partir dele que o projeto é concebido, uma vez que é necessário determinar qual será o montante de energia que será fornecido. Por exemplo, a energia elétrica que é cobrada pela distribuidora na conta de luz é expressa em kWh. Ou seja, a geração de energia é um fator determinante na definição de um projeto.

O fator de capacidade é uma medida importante para comparar a eficiência de projetos de geração de energia elétrica com a mesma potência, pois a quantidade de energia gerada pode variar de acordo com as condições em que cada projeto está instalado. Por exemplo, em um projeto de geração distribuída, é preciso garantir que a energia gerada seja suficiente para compensar o consumo do cliente. Por isso, é necessário instalar uma potência adequada que atenda a demanda de energia do cliente e leve em consideração o fator de capacidade da fonte de geração escolhida.

3. O Tempo

Embora possa parecer óbvio, é fundamental dar a devida importância às quantidades totais de horas que representam diferentes períodos de tempo, como dias, meses e anos.

Assim sendo, as seguintes quantidades de horas são utilizadas nos cálculos:

Dias: 24 horas

Meses: 720 horas (média anual de 30 dias, multiplicado por 24 horas)

Anos: 8760 horas (365 dias multiplicado por 24 horas). Em cálculos de longo prazo, pode-se levar em conta os anos bissextos com 8766 horas.

Deste modo, o Fator de Capacidade é um indicador crucial que determina a eficiência de uma usina de geração de energia. Ele é definido como a relação entre a energia efetivamente gerada e a capacidade máxima que a usina pode produzir. Em outras palavras, é uma medida da proporção entre a energia produzida e a capacidade instalada do sistema de geração de energia. Portanto, o potencial máximo de energia gerada por um sistema é determinado pela multiplicação da sua potência nominal pelo período de tempo analisado.

Ainda segundo (Elson Martins e Al, 2013) [23], ele é uma medida que relaciona a produção real de energia elétrica da usina em um determinado período de tempo com sua capacidade total máxima nesse

⁶Um Módulo Fotovoltaico é uma unidade formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica, Definição NBR 16.690

mesmo período. Essa medida é usada para avaliar a "eficiência" dos sistemas de geração de energia em relação à sua capacidade nominal e permite a comparação de projetos com diferentes capacidades nominais. Embora seja uma medida adimensional, o fator de capacidade é mais uma medida de eficiência econômica do que física. Para calcular o fator de capacidade de uma usina eólica, utiliza-se a fórmula mostrada a seguir:

$$FC = \frac{GA}{N_h \times P_n} \quad (2.1)$$

Onde:

- FC é o Fator de Capacidade;
- GA (MWh) é a Geração anual da usina;
- N_h ($hora$) é o número de horas em um ano;
- P_n (MW) é a potência nominal da usina;

O presente trabalho tendo como foco a elaboração de uma proposta de mix energético composto exclusivamente de fonte renováveis, vale ressaltar como cada uma das fontes escolhidas para o efeito deste trabalho é gerada, seus benefícios e desafios para a sua utilização em larga escala.

2.5 ENERGIA SOLAR

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2017) [24], a energia solar é uma fonte inesgotável devido à escala temporal da vida no planeta Terra. O sol é uma estrela que emite energia devido às reações de fusão nuclear dos átomos de hidrogênio, convertendo-os em hélio. Por esse motivo, a energia solar é uma das alternativas mais promissoras para suprir as demandas energéticas da humanidade.

A energia solar é uma fonte de energia renovável que apresenta um enorme potencial de geração de eletricidade e calor. De fato, o Sol fornece diariamente uma quantidade significativa de energia para a atmosfera terrestre, equivalente a $5,445 \times 10^{24}$ joules ou $1,5125 \times 10^{18}$ kWh. Esse valor é comparativamente muito maior do que a energia produzida por todos os sistemas desenvolvidos pelo homem em 1970, que foi de apenas 2×10^{20} joules ou 0,004% da energia total recebida do Sol. Por essa razão, um crescente interesse tem sido dedicado ao estudo das possibilidades de aproveitamento da energia solar. No entanto, é necessário um conhecimento detalhado da energia solar disponível, incluindo sua quantidade, frequência e comprimento de onda.

2.5.1 A energia solar na África

De acordo com um documento escrito por Pierre-Paul Dika Elokun [25], a África é um continente fortemente irradiado pelo sol e tem uma das mais longas durações de insolação. Em 2018, a produção de

eletricidade solar fotovoltaica foi de 5277 GWh e a das centrais solares termoeletricas foi de 1.978 GWh, representando 0,6% e 0,2% da producao total de eletricidade do continente, respectivamente. As producoes mundiais correspondentes foram de 554.382 GWh e 11.321 GWh. A participacao da Africa foi de 0,95% para a fotovoltaica e 17,5% para a solar termoeletrica.

De acordo com a IRENA (Agencia Internacional de Energia Renovavel), as capitais dos paises africanos possuem uma irradiacao solar variando de 1750 a 2500 kWh/m²/ano e 39 paises tem uma fonte solar superior a 2000 kWh/m²/ano. A Namibia atinge o nivel mais alto, com 2512 kWh/m²/ano, e o Sudao, a Somalia e o Egito ultrapassam 2400 kWh/m²/ano, bem acima do nivel da Alemanha, que tem em media 1150 kWh/m²/ano.

No entanto, a capacidade instalada do parque solar alemao foi de 40.000 MW em 2016, contra apenas 21 MW para a Africa. A IRENA observa que os projetos solares fotovoltaicos de grande porte que entraram em operacao na Africa em 2018 tinham um custo medio ponderado de producao de U\$0,12 /kWh, 40% acima da media mundial.

1. Caracteristicas fundamentais

Segundo o documento do GEPEA⁷ [26], a transmissao de energia do Sol para a Terra ocorre por meio de radiao eletromagnetica, e a maior parte da radiao solar (97%) esta contida em comprimentos de onda entre 0,3 e 3,0 μm , caracterizando-a como radiao de onda curta. E importante conhecer a intensidade e a composicao da radiao ao analisala na superficie terrestre. A radiao solar incidente no topo da atmosfera sofre reflexao, dispersao e absorcao ao percorrer sua trajetoria ate atingir o solo, devido a flutuacoes climaticas. A incidencia total da radiao solar em um corpo na superficie terrestre e a soma das componentes direta, difusa e refletida como mostrado na *figura 2.11*. A radiao direta e a radiao solar proveniente diretamente do disco solar, sem nenhuma mudanca de direcao, exceto aquela causada pela refracao atmosferica. A radiao difusa e aquela recebida por um corpo apos a direcao dos raios solares ter sido modificada por reflexao ou espalhamento na atmosfera. A quantidade de radiao refletida depende das caracteristicas do solo e da inclinacao do equipamento de captacao.

⁷GEPEA – Grupo de Energia Escola Politecnica Universidade de Sao Paulo

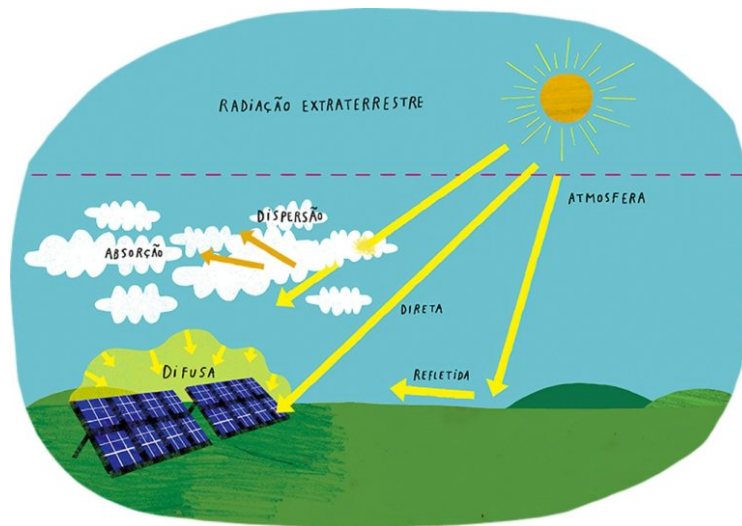


Figura 2.11: Incidência da radiação solar na superfície.
(Fonte: Casa e Mercado, Para além da orientação Solar.)

2. Instrumentos de medição da radiação solar

Os instrumentos solarimétricos medem a densidade de potência da radiação solar incidente por unidade de área, integrada em vários comprimentos de onda. Essa radiação cobre todo o espectro visível, de 0,4 a 0,7 μm , parte do ultravioleta próximo de 0,3 a 0,4 μm e infravermelho no intervalo de 0,7 a 5 μm . As medições padrões incluem a radiação total e a componente difusa no plano horizontal, e a radiação direta normal. Existem vários instrumentos de medição da radiação solar como:

- **O heliógrafo**, que mede a duração da insolação; ou seja, o período de tempo durante o qual a quantidade de radiação solar excede um determinado valor de referência conhecido como "número de horas de brilho de Sol". ele funciona concentrando a radiação solar em uma carta que fica escurecida como resultado da exposição.
- piranômetros, que são capazes de medir a quantidade total de radiação, incluindo a radiação proveniente de todas as direções no hemisfério. Dentre eles, destacam-se os piranômetros fotovoltaicos e termoeletrônicos.;
- **O piroheliômetro**, que é usado para medir a radiação que vem diretamente do sol. O instrumento é projetado de tal forma que tem uma abertura pequena para que possa "enxergar" apenas o disco solar e a área ao seu redor, conhecida como circunsolar.;
- **O actinógrafo**, que é usado para medir a radiação total ou a radiação difusa, e que possui tanto o sensor quanto o registrador na mesma unidade. O dispositivo é composto por um receptor com três tiras metálicas, sendo que a tira central é preta e as laterais são brancas. As tiras brancas são fixadas, enquanto a tira preta está solta em uma das extremidades e se curva quando é iluminada, devido aos diferentes coeficientes de dilatação dos metais que compõem as tiras.

Os dados solarimétricos são apresentados na forma de energia coletada ao longo de um dia, sendo este parâmetro uma média mensal ao longo de muitos anos. As unidades de medição mais frequentes

incluem Langley/dia (ly/dia), cal/cm² dia, e Wh/m². A intensidade da radiação solar incidente na superfície terrestre varia com as condições atmosféricas, sendo máxima em céu aberto sem nuvens, atingindo 1 kW/m² ao meio-dia em locais ao nível do mar, 1,05 kW/m² a 1000 metros de altura e 1,1 kW/m² em altas montanhas. A intensidade fora da atmosfera é de 1,377 kW/m² e é chamada de constante solar, variando com a distância da Terra em torno do Sol.

Neste trabalho, a forma mais usual de descrever a quantidade de energia solar que incide sobre uma superfície será através da irradiação solar, que é medida em termos de energia por unidade de área (Wh/m²). Embora a energia solar atinja todas as partes da Terra, a quantidade de energia que chega em cada região não é uniforme. Por exemplo, as regiões próximas ao equador recebem muito mais irradiação solar diária do que as regiões próximas aos polos. Para projetos fotovoltaicos, é necessário que a irradiação solar mínima seja de 3 a 4 kWh/m²/dia [27].

3. Estimativa da radiação solar

Para realizar projetos de sistemas solares, é necessário compreender a quantidade de energia captada pelos painéis fotovoltaicos, que são os equipamentos responsáveis pela coleta. Essa informação pode ser obtida por meio de dados fornecidos pelas estações solarimétricas, que registram a radiação solar global média mensal no plano horizontal. Essa radiação que chega à Terra sofre desvios em sua trajetória devido a superfície terrestre e as relações geométricas entre a Terra e o Sol, por isso foram denominados ângulos para diferenciar as formas como os raios solares atingem a atmosfera terrestre (Figura 2.12) [27, 28]

- **Ângulo Zenital (θ_z):** O ângulo resultante da intersecção dos raios solares com uma superfície vertical;
- **Elevação ou Altura Solar (α):** ângulo entre os raios do sol e a projeção desses raios no plano horizontal. Esse ângulo é composto pelo ângulo zenital e pelo ângulo de altura solar, que são complementares, ou seja, a soma desses ângulos é igual a 90 graus. O ângulo zenital é medido a partir da vertical, enquanto o ângulo de altura solar é medido a partir do horizonte;
- **Ângulo Azimutal do Sol ou azimute solar (γ_s):** O trecho descreve o ângulo formado entre a direção norte-sul no horizonte do observador e a projeção dos raios solares no plano horizontal. O Norte geográfico é adotado como referência zero grau, e o ângulo é considerado positivo quando há deslocamento para Leste e negativo quando há deslocamento para Oeste, variando de -180° a 180°;
- **Ângulo Azimutal da superfície (γ):** ângulo formado entre a linha perpendicular à superfície no plano horizontal e a direção que aponta para o Norte ou para o Sul;
- **Ângulo de incidência (θ):** O ângulo formado entre os raios solares e uma linha perpendicular à superfície de captação;
- **Ângulo de inclinação (β):** é o ângulo formado entre a superfície de coleta e o plano horizontal. Ele pode variar de 0° a 90°;
- **Ângulo Hora Angular (ω):** é o ângulo de deslocamento Leste-Oeste do meridiano do Sol que varia em relação ao meridiano local. A cada hora, o ângulo muda em 15°. A variação total pode ser de -180° a 180°. Os horários da manhã são considerados negativos, o meio-dia é zero, e as horas da tarde são positivas

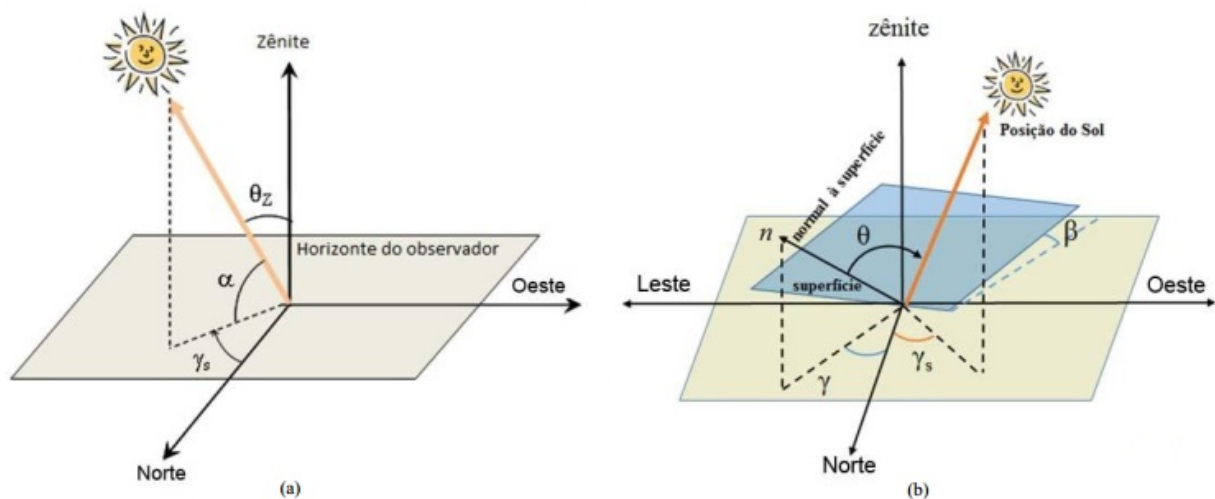


Figura 2.12: (a) Os diversos ângulos que existem entre a posição do Sol e o plano horizontal e (b) Ilustração de uma superfície inclinada (módulo fotovoltaico) em relação ao mesmo plano horizontal (Fonte: CRESESB, 2014).

2.5.2 Sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico consiste em um conjunto de equipamentos eletrônicos conectados para produzir energia elétrica. Geralmente, ele é composto por três blocos principais: um bloco gerador, que pode incluir painéis solares, uma estrutura para sustentar os painéis e cabos para conexão elétrica; um bloco de potência, que contém equipamentos como inversores, conversores de corrente e dispositivos de proteção e controle; e um bloco de armazenamento, que pode incluir uma ou mais formas de armazenar a energia produzida. O objetivo do sistema é gerar eletricidade a partir da energia solar [27].

• Princípio de funcionamento.

Os sistemas de energia solar fotovoltaica são responsáveis por converter a energia solar que chega à superfície da Terra em energia elétrica. Geralmente, essa energia elétrica é direcionada para a rede elétrica de baixa ou média tensão, ou é utilizada para abastecer cargas em locais isolados. Isso resulta na existência de dois tipos distintos de sistemas de energia solar fotovoltaica: os Sistemas Conectados à Rede Elétrica e os Sistemas Fotovoltaicos Isolados.

Esses dois tipos de sistemas apresentam diferenças significativas em relação aos requisitos e, conseqüentemente, em relação aos componentes que os integram. Além disso, os procedimentos para projetar e dimensionar esses componentes seguem requisitos distintos.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) não possuem capacidade de armazenamento de energia. Como resultado, a energia gerada por esses sistemas é direcionada para a carga que está sendo alimentada, enquanto o excesso de energia é transferido para a rede de distribuição. Quanto aos sistemas fotovoltaicos isolados (SFVI), eles são sistemas de geração de energia que não estão conectados à rede elétrica convencional e costumam incluir um mecanismo de armazenamento de energia para uso posterior.

2.5.3 Alguns conceitos teóricos fundamentais para um melhor dimensionamento de um sistema fotovoltaico

Os seguintes dados são essenciais para iniciar o dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico:

- Energia consumida (E_{cons}), que pode ser diária, mensal ou anual, mas é necessário convertê-las para consumo diário;
- Eficiência do sistema de armazenamento de energia ($\eta_{storage}$);
- Irradiação global média anual (I_{GLO}) no plano inclinado no local de instalação.

A eficiência geral do sistema de armazenamento de energia ($\eta_{storage}$) pode ser calculada multiplicando as eficiências individuais dos equipamentos envolvidos nessa etapa, como as baterias (η_b) e o controlador de carga ($\eta_{control}$), se utilizado. A eficiência do sistema de armazenamento é importante para determinar a quantidade de energia que pode ser armazenada e utilizada posteriormente. A equação 2.2 permite calcular a eficiência geral do sistema de armazenamento.

$$\eta_{storage} = \eta_b \times \eta_{control} \quad (2.2)$$

Para estimar a quantidade de energia demandada durante o ciclo noturno em um sistema de energia solar fotovoltaica, é importante ter em mãos a curva de consumo diário e a curva diária média da irradiância global diária no plano horizontal do local onde o sistema será instalado. Essas informações ajudam a estimar a quantidade de energia demandada no ciclo sem produção ($E_{noturno}$), que ocorre geralmente durante a noite. A curva de consumo diário indica o padrão de consumo de energia ao longo do dia, enquanto a curva diária média da irradiância global diária no plano horizontal indica a quantidade de energia solar disponível para o sistema durante o dia. A partir dessas informações, é possível realizar uma estimativa da quantidade de energia necessária para suprir o consumo durante o ciclo noturno.

Ao projetar a curva de irradiância global diária com a curva de consumo diário, pode-se determinar o período em que o sistema está no ciclo de não geração, que é geralmente das 18h às 6h do dia seguinte, totalizando 12 horas. Com esses dados, pode-se calcular a energia ($E_{storage}$) que precisa ser gerada para o sistema de armazenamento através da equação 2.3

$$E_{storage} = \frac{E_{noturno}}{\eta_{storage}} \quad (2.3)$$

A equação 2.4 permite calcular a energia diária demandada para a geração (E_{demand}). Essa energia é necessária para suprir o consumo diário do sistema de armazenamento de energia, levando em consideração a eficiência desse sistema. Portanto, a partir dos dados obtidos anteriormente, é possível utilizar a equação 2.4 para estimar a quantidade de energia que o sistema fotovoltaico deve gerar diariamente, a fim de atender à demanda energética do sistema de armazenamento.

$$E_{demand} = E_{cons} - E_{noturno} + E_{storage} \quad (2.4)$$

No caso específico de querer suprir 40% do consumo per capita atual do Benin, considerando a média mundial, o aspecto que deve ser levado em conta é a Energia Consumida (E_{cons}). É possível obter esse dado a partir do consumo mensal ou anual que se deseja suprir, porém, é necessário analisá-lo em relação ao consumo diário através das equações 2.5 ou 2.6

$$E_{cons} = \frac{E_{cons}(mensal)}{30} \quad (2.5)$$

$$E_{cons} = \frac{E_{cons}(anual)}{365} \quad (2.6)$$

Onde:

- $E_{cons}(mensal)$ é o consumo mensal em termo de energia elétrica;
- $E_{cons}(anual)$ é o consumo anual em termo de energia elétrica;

Fazendo uso da irradiância global média (I_{GLO}), é possível calcular as Horas de Sol Pleno (HSP) (equação 4.8 por dia, que refletem o tempo em que a radiação solar permanece constante e igual a $1kW/m^2$. Segundo o CRESESB, [27], para estimar a eficiência dos módulos solares e levar em consideração as possíveis perdas que podem ocorrer no sistema, é utilizado um fator de desempenho, conhecido como Performance Rate (P_R) e é comum adotar um valor de PR em torno de 80%, que é próximo do que é observado na prática para sistemas fotovoltaicos. Essa estimativa considera perdas ôhmicas, sombreamento, sujeira e outros tipos de perdas que podem afetar a eficiência do sistema.

$$HSP = \frac{I_{GLO}}{1kW/m^2} \quad (2.7)$$

Com base nas informações sobre a energia consumida, a eficiência do sistema de armazenamento de energia, a irradiância global média no local da instalação e o desempenho do sistema, é possível calcular a potência total ($Pot_{modulos}$) dos módulos fotovoltaicos que serão necessários para o sistema. Essa potência pode ser obtida através da equação 2.8 [27]

$$Pot_{modulos} = \frac{E_{demand}}{HSP \times P_R} \quad (2.8)$$

Com o valor da potência total de módulos fotovoltaicos a ser instalada ($Pot_{modulos}$), é possível determinar a quantidade de módulos necessária ($N_{modulos}$) usando a equação 2.9. Para este efeito, é preciso escolher o tipo de módulo e obter sua potência nominal ($Pot_{nominal}$). Se o resultado for um valor não inteiro de módulos, é possível trocar os módulos por outros de potência mais adequada ou então arredondar a quantidade para o próximo valor inteiro maior.

$$N_{modulos} = \frac{Pot_{modulos}}{Pot_{nominal}} \quad (2.9)$$

Após determinar a quantidade de módulos fotovoltaicos necessários, é importante escolher o inversor adequado para o sistema, considerando que se trata de um sistema off-grid. A potência de saída do inversor (Pot_{out}) deve ser determinada levando em conta um fator de dimensionamento do Inversor

(F_{DI}), que é necessário devido às perdas do sistema. Grande maioria dos inversores suportam uma entrada de potência maior do que sua potência nominal, em uma faixa de F_{DI} indicada pelo fabricante ou entre 75% e 85% de subdimensionamento do inversor. No entanto, é importante observar as tensões e correntes nominais de entrada do inversor. A potência de saída do inversor pode ser calculada pela equação 22.10.

$$Pot_{out} = F_{DI} \times Pot_{nominal} \quad (2.10)$$

Outros fatores a serem levados em consideração para escolher o inversor adequado são:

- Corrente máxima de entrada;
- Tensão máxima de entrada ou faixa de tensão do Seguidor de Ponto de Potência Máxima (SPPM);
- Eficiência do inversor;
- Sobredimensionamento máximo;
- Tensão, corrente e frequência de saída.

No caso de um inversor do tipo SPPM (Single Phase Pulse Modulation), é importante garantir que a faixa de tensão e corrente de saída dos módulos fotovoltaicos esteja dentro da faixa de entrada de tensão (V_{SPPM}) e corrente (I_{SPPM}) do inversor. Isso inclui levar em consideração os valores máximos e mínimos estimados de tensão de circuito aberto (V_{OC} expressa na equação 2.13) e corrente de curto-circuito (I_{SC} expressa na equação 2.14) para os extremos de temperatura anuais no local de instalação do sistema.

$$\beta = \frac{\Delta V_{OC}}{\Delta T} \quad (2.11)$$

$$\alpha = \frac{\Delta I_{SC}}{\Delta T} \quad (2.12)$$

$$V_{OC}(T) = V_{OC} \times (1 + \beta \times (T - 25^\circ)) \quad (2.13)$$

$$I_{SC}(T) = I_{sc} + \alpha \times (T - 25^\circ) \quad (2.14)$$

Para calcular esses valores de tensão e corrente, são necessários os coeficientes β e α específicos do módulo fotovoltaico utilizado calculados em 2.11 e 2.12 respectivamente.

Com base nos valores calculados, é possível determinar a disposição dos módulos fotovoltaicos, ou seja, como eles serão agrupados em série (strings) e em paralelo (arrays), para que fiquem dentro da faixa aceitável de valores máximos e mínimos das entradas do inversor. A partir desses dados, também é possível determinar a quantidade máxima e mínima de módulos que podem ser associados em série ($N_{Pstrings}$) (usando a equação 2.15) e em paralelo ($N_{Parrays}$) (usando a equação 2.16).

$$\frac{V_{SPPMmin}}{V_{OC}(T_{max})} < N_{Pstrings} < \frac{V_{SPPMmax}}{V_{OC}(T_{min})} \quad (2.15)$$

$$N_{Parrays} < \frac{I_{SPPMmax}}{I_{SC}(T_{max})} \quad (2.16)$$

Ao analisar a curva que relaciona a profundidade de descarga (P_D) com a quantidade de ciclos da bateria, é possível determinar qual profundidade de descarga será utilizada no banco de baterias. Essa escolha é importante, pois influencia diretamente na quantidade de ciclos que a bateria poderá suportar ao longo de sua vida útil. Além disso, é importante observar a taxa de descarga da bateria (C), que está relacionada com a capacidade de carga ($C_{bateria}$). A taxa de descarga deve ser escolhida de acordo com o tempo de descarga em que a bateria ficará condicionada.

Para determinar a quantidade de energia que deve ser armazenada no banco de baterias ($E_{bat_{storage}}$), é necessário utilizar a equação 2.17.

$$E_{bat_{storage}} = \frac{E_{storage} \times n}{P_D} \quad (2.17)$$

Com n o número de dias de autonomia do sistema de armazenamento de energia, que representa a quantidade máxima de dias que o banco de baterias é capaz de fornecer energia sem ser recarregado. A escolha desse valor é determinada pelo projetista e pelo uso pretendido do sistema, sendo comum recomendar valores a partir de 2 dias de autonomia. No entanto, em regiões com longos períodos chuvosos, é aconselhável aumentar a autonomia do sistema para garantir o fornecimento de energia durante esses períodos. No entanto, é fundamental destacar que quanto mais extensa for a autonomia desejada, maior será a quantidade de baterias necessárias para atingir esse objetivo.

Para determinar a tensão do banco de baterias (V_{banco}), é necessário conectar as baterias em série, garantindo que a tensão resultante esteja dentro da faixa suportada pelo controlador de carga. Além disso, o controlador deve ser capaz de suportar 1.25 vezes a maior corrente no sistema, seja ela proveniente dos módulos ou da carga. Caso a corrente seja maior do que a suportada pelo controlador, será necessário conectar mais de um controlador em paralelo ou substituí-lo por um com especificações técnicas mais elevadas. Com base na tensão escolhida para o banco de baterias, é possível calcular o número de baterias que devem ser conectadas em série ($N_{BatSerie}$), utilizando a equação 2.18. A capacidade de armazenamento do banco de baterias pode ser calculada por meio da equação 2.19.

$$N_{BatSerie} = \frac{V_{banco}}{V_{bat}} \quad (2.18)$$

$$C_{banco} = \frac{E_{bat_{storage}}}{V_{banco}} \quad (2.19)$$

A equação 2.19 fornece o valor da capacidade de armazenamento do banco de baterias necessário para suprir a demanda energética diária do sistema fotovoltaico. Com esse valor em mãos, é possível

calcular o número de baterias ($N_{BatParalel}$) que devem ser associadas em paralelo para atender a essa demanda, por meio da equação 2.20.

$$N_{BatParalel} = \frac{C_{banco}}{C_{bateria}} \quad (2.20)$$

Por fim, o número total de baterias (NT_{bat}) necessário no banco de baterias é obtido usando a equação 2.21 seguinte:

$$NT_{bat} = N_{BatSerie} \times N_{BatParalel} \quad (2.21)$$

• **Vantagens e desvantagens da energia solar**

A energia solar pode ser usada em diversas aplicações, desde pequenas instalações domésticas até grandes usinas solares. No entanto, como qualquer fonte de energia, a energia solar tem suas vantagens e desvantagens, que devem ser consideradas antes de sua adoção em larga escala. A seguir, serão abordados tanto os benefícios quanto os desafios da energia solar, a fim de oferecer uma visão abrangente sobre essa forma de energia renovável.

Segundo da Silva e Al [29], considerando os benefícios da energia solar, eles podem ser classificados em três diferentes esferas a saber:

1. ***Esfera Socioeconómica.***

- Diminuição dos custos de energia elétrica tanto para a população como para as empresas;
- Criação de empregos de alta qualidade no âmbito local;
- Promoção do desenvolvimento de novos setores produtivos;
- Estímulo para o crescimento das economias locais, regionais e nacionais.

2. ***Esfera Ambiental.***

- Produção de energia que é limpa, renovável e sustentável;
- Ajuda a alcançar as metas de redução de emissões tanto a nível global quanto nacional;
- Não gera emissões gasosas, líquidas ou sólidas durante o seu funcionamento.

3. ***Esfera Estratégica.***

- Busca por uma matriz elétrica mais diversificada no país;
- Expansão da utilização de fontes de energia renovável no território nacional;
- Diminuição das perdas decorrentes da transmissão e distribuição de energia elétrica.

Por outro lado, a energia solar apresenta poucas desvantagens, que estão principalmente relacionadas ao seu caráter intermitente e sendo assim, sua incapacidade de gerar energia durante a noite. Além disso, o alto custo inicial para a instalação do sistema pode ser uma barreira, já que as células e

painéis solares têm um preço mais elevado. No entanto, esse custo pode ser justificado pela durabilidade e economia a longo prazo. Por outro lado, a falta de incentivos fiscais do governo pode tornar essa opção menos acessível para a população em geral.

2.6 ENERGIA HIDRELÉTRICA NO MUNDO: PANORAMA GERAL

A energia hidrelétrica é a eletricidade produzida pela força da água em usinas geradoras chamadas hidrelétricas. De acordo com a Agência Internacional de Energia, a energia hidrelétrica representa 16% da energia gerada globalmente e é a terceira fonte mais usada, ficando atrás apenas do carvão e do gás natural.

Uma usina hidrelétrica transforma a energia hidráulica de um curso de água, natural ou artificial, em eletricidade renovável [30].

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) [31], a geração hidrelétrica diminuiu 15 TWh (queda de 0,4%) em 2021, caindo para 4327 TWh, apesar de um aumento significativo no crescimento da capacidade. A queda foi causada por secas em várias partes do mundo. No entanto, a hidrelétrica continua sendo a maior fonte renovável de eletricidade, gerando mais do que todas as outras tecnologias renováveis combinadas. No Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050, a energia hidrelétrica mantém uma taxa média anual de crescimento de geração de cerca de 3% em 2022-2030 para fornecer aproximadamente 5700TWh de eletricidade por ano. Nos últimos cinco anos, a taxa de crescimento foi de apenas um terço do que é necessário, sinalizando a necessidade de esforços significativamente maiores, especialmente para agilizar o licenciamento e garantir a sustentabilidade do projeto. As usinas hidrelétricas devem ser reconhecidas como uma espinha dorsal confiável dos sistemas de energia limpa do futuro e apoiadas de acordo.

A queda na geração foi causada por secas persistentes em países ricos em energia hidrelétrica, como Brasil, Estados Unidos, Turquia, China, Índia e Canadá, levando a uma utilização da capacidade hidrelétrica menor do que o normal. Ao mesmo tempo, as adições de capacidade em 2021 atingiram 35 GW, 50% acima da média dos cinco anos anteriores. No entanto, secas severas continuam em 2022, o que pode resultar na continuação da geração abaixo da média. A China foi responsável por 66% do crescimento da capacidade, graças ao comissionamento de vários projetos de grande porte. O pipeline de projetos atual indica a continuação do forte crescimento em 2022 e, em seguida, uma desaceleração subsequente devido à disponibilidade esgotada de locais adequados nos mercados hidrelétricos mais dinâmicos, especialmente na China.

2.6.1 Hidrologia do Benin

O Benin é um país caracterizado por uma variedade de bacias hidrográficas e sistemas fluviais. A topografia do Benin influencia a distribuição e o fluxo das águas superficiais e subterrâneas, desempenhando um papel importante na disponibilidade de recursos hídricos para o país.

No norte, a bacia do Níger capta as águas dos seguintes afluentes de oeste a leste:

1. O rio Mékrou (410 km),
2. O rio Alibori (338 km),
3. O rio Sota (250 km),
4. O rio Níger, que marca a fronteira entre a República do Benin e a República do Níger por 120 km.

No noroeste, podemos distinguir:

1. A bacia do Volta, que captura o rio Pendjari, que por sua vez captura os rios Kounné, Tigou, Sarga, Podiega, Magou e Yabêti;
2. As bacias dos rios Kéran e Kara.

Também existem nas encostas sul do Maciço de Atacora e nas encostas oeste e sudoeste das Montanhas Tanéka, uma densa rede hidrográfica, cujos eixos principais são formados pelos primeiros afluentes do rio Kéran. As encostas desses rios são bastante íngremes, especialmente nas nascentes e nas saídas das rochas mais resistentes; é nessas áreas que foram identificados muitos locais de microcentrais hidrelétricas[32].

Os diferentes afluentes do rio Níger captam outros rios que são:

- Para o Alibori: os rios Morokou, Kpare, Konekoga, Kpako, Souedarou.
- Para o Sota: o rio Tassine (3031, km² em 102, km), o rio Bouli (2380, km² em 145, km), o rio Irane (1832, km² em 95, km).
- Para o Mékrou: o rio Tikou darou (505, km²), o rio Yaourou, o rio Kourou (572, km²). O sistema Sul, cujas águas convergem para o Golfo do Benin, é constituído pelas seguintes bacias:

A bacia do Ouémé, cuja rede hidrográfica é composta por:

- O rio Alpouro (2010 km² em 86 km).
- O rio Yérou Maro (2590 km² em 120 km).
- O rio Beffa (1990 km² em 78 km).
- O rio Okpara (mais de 10.000 km² em 362 km).
- O rio Ouémé até o Alpouro (4320 km² em 152 km).
- O rio Donga (1285 km² em 74 km).
- O rio Wéwé (617 km² em 49 km).
- O rio Térou (3320 km² em 139 km).
- O Odora (1076 km² em 74 km).
- O rio Adjiro (2151 km² em 160 km).

- O rio Nonome.

- O rio Tévé

A bacia do Zou, cuja rede hidrográfica é composta por:

- O rio Otio (442 km²).
- O rio Bogui (1450 km²).
- O rio Kouffo (806 km²), o rio Agbla (479 km²).
- O rio Agbado.
- O rio Klou

A bacia do Couffo, cuja rede hidrográfica é composta por:

- O rio Aiokpé (47 km²).
- O rio Gougou (36 km²).
- O rio Honve (166 km²).
- O rio Agougan (90 km²).
- O rio Dra (147 km²).

2.6.2 Funcionamento de uma usina hidrelétrica: Da água até uma energia verde.

De modo geral, o esquema de uma usina elétrica inclui uma barragem - uma barragem ou um dormitório - que intercepta o curso de água, criando um reservatório.

A energia hidrelétrica é produzida pela conversão da energia cinética da água em movimento. Esse processo ocorre nas usinas hidrelétricas, onde as turbinas e geradores na casa de força transformam a energia da água em energia elétrica.

O armazenamento de água nos reservatórios é responsável por armazenar a energia potencial gravitacional, que é liberada quando a água é liberada e entra na casa de força em alta velocidade. O movimento das turbinas aciona os geradores, convertendo a energia cinética em energia elétrica (Ver figura 2.13).

A água que passou pelo processo é redirecionada de volta para o rio, enquanto a eletricidade assim obtida é transformada para ser transmitida em grandes distâncias: antes de ser introduzida nas linhas de transmissão, a eletricidade passa então pelo transformador, o que diminui a intensidade da corrente produzida pelo gerador elétrico rotativo, mas aumenta sua voltagem.

Quando chega ao local de uso, antes de ser utilizada, a energia passa novamente por um transformador, o que desta vez aumenta a intensidade da corrente e diminui a tensão para que seja adequada para uso industrial, comercial ou doméstico. [33][30].

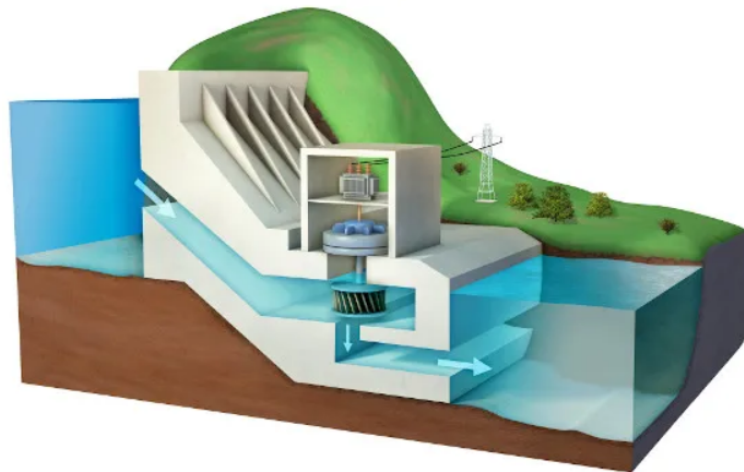


Figura 2.13: Funcionamento de usina hidrelétrica (Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br>)

2.6.3 Formas de produção de energia hidrelétrica: as diferentes formas de geração

As usinas hidrelétricas podem ser de três tipos: a fio d'água (*Geradora de água corrente*), o reservatório (*Central elétrica da bacia*) ou o armazenamento [30].

1. *Usina geradora de água corrente*

Neste tipo de usina, o fluxo natural de um rio ou riacho é utilizado diretamente, cuja água é canalizada para as turbinas e, em seguida, alimentada de volta ao fluxo natural a jusante da usina.

2. *Central elétrica da bacia*

Em uma usina de energia de reservatório, a água de um ou mais córregos se acumula em um reservatório, seja natural ou artificial (criado por uma barragem), e depois flui para jusante para acionar as turbinas e finalmente voltar ao rio. Neste tipo de usina, portanto, a produção de eletricidade e a água disponível podem ser controladas tanto em termos de vazão quanto de quantidade.

3. *Armazenagem central*

As usinas de armazenamento ou de armazenamento por bombagem têm dois reservatórios em diferentes elevações, um a montante e outro a jusante, o segundo dos quais serve como reserva de energia.

Isto permite um regime duplo: em momentos de menor demanda de energia, a água, uma vez caída na bacia a jusante (novamente passando pelas turbinas e gerando eletricidade), pode ser feita fluir de volta para a bacia a montante, usando as mesmas turbinas atuando desta vez como um sistema de bombeamento elétrico.

Nas centrais elétricas de armazenamento, portanto, a água pode ficar novamente disponível para a produção de eletricidade quando a demanda é maior. Neste sentido a central elétrica pode funcionar em ciclo fechado: não está necessariamente ligada ao fluxo de um curso de água, e funciona como um "acumulador" de energia, que pode ser convertida em eletricidade.

Por exemplo, no caso de acoplamento com uma usina eólica, o excesso de eletricidade gerada em momentos de vento sustentado pode ser usado para acionar as turbinas para bombeamento; quando o vento está ausente, a eletricidade é gerada com as turbinas hidroelétricas, mesmo em um prazo muito curto.

Desta forma, a estação de energia atua como uma "bateria" recarregável, que pode ser carregada e depois liberada a qualquer momento: desta forma, fontes intermitentes como sol e vento podem ser utilizadas de forma otimizada e contínua, e a estação de energia hidrelétrica de armazenagem por bombagem ajuda a garantir a estabilidade do sistema de energia; razão pela qual essas centrais elétricas de armazenamento são chamadas de *Acumuladores "naturais"*.

2.6.4 Vantagens e desvantagens da energia hidrelétrica

A energia hidrelétrica, nascida no século XIX, é a mais antiga das fontes renováveis de energia e ainda hoje é de longe a mais importante em termos quantitativos: como indica a Agência Internacional de Energia Renovável (International Renewable Energy Agency - IRENA), sua capacidade instalada é igual à soma de todas as outras juntas.

É uma fonte que contribui de forma importante para o combate à mudança climática, pois evita o uso de combustíveis fósseis e reduz as emissões de dióxido de carbono, gases que alteram o clima e material particulado, contrastando assim a poluição e o efeito estufa.

Como em outras fontes verdes, as vantagens tendem a aumentar com o tempo à medida que o desempenho e a eficiência aumentam e, em paralelo, os materiais são melhor reciclados, os custos são otimizados e o impacto sobre o meio ambiente é reduzido. Algumas características, no entanto, diferenciam a energia hídrica de outras renováveis: aqui estão algumas vantagens que dizem por que a energia hídrica desempenha um papel de primeiro plano no equilíbrio energético mundial [34].

- **É limpa e sustentável**

A energia hidrelétrica é uma fonte limpa, pois gera eletricidade sem emitir gases de efeito estufa ou outros poluentes: contribui para diminuir o consumo de combustíveis fósseis, reduzindo a poluição do ar e mitigando a mudança climática.

E é uma energia renovável - ilimitada no tempo - porque são as suas fontes que se renovam, ou seja, rios e riachos alimentados pelo ciclo natural da água. Além disso, uma usina hidrelétrica não retira água do meio ambiente, porque a água retirada é totalmente devolvida com o tempo: sua pegada hídrica é, portanto, baixa.

É também um recurso disponível em muitos países, que pode assim produzir energia de forma mais auto-suficiente e sustentável, reduzindo a importação de matérias primas.

- **É um recurso muito flexível**

Diante da disponibilidade de água que pode variar com o tempo, as centrais elétricas são extremamente flexíveis. Os sistemas de produção requerem apenas uma quantidade muito pequena de energia para arrancar, de tal forma que em questão de minutos até mesmo uma grande usina pode

passar da inatividade à plena potência, e vice-versa. Esta capacidade de resposta depende do tipo de turbina utilizada e da gestão dos fluxos de água.

- **Estabiliza a rede elétrica, evitando a intermitência**

Uma usina hidrelétrica de armazenamento por bombeamento atua como um depósito de energia: o excesso de eletricidade produzido por usinas eólicas ou solares quando as condições climáticas são favoráveis pode ser usado para bombear água para o reservatório superior. Em seguida, quando não há sol ou vento, a água pode ser lançada para gerar eletricidade através de turbinas. Desta forma, a usina hidrelétrica tem um efeito estabilizador sobre a rede elétrica.

- **Reduz o risco de inundação**

Uma usina hidrelétrica não gera apenas eletricidade, mas interage com o território em que está localizada, contribuindo para seu desenvolvimento.

Em primeiro lugar, inclui uma clara vantagem para o meio ambiente: a quantidade de água que é liberada (após gerar eletricidade) pode ser controlada ao longo do tempo e com grande precisão, tanto em termos de vazão quanto de volume total. Isto significa ser capaz de regular o fluxo continuamente, reduzindo muito o risco de inundação em caso de chuvas fortes, o que também beneficia as culturas em áreas irrigadas a jusante.

- **Ajuda na recuperação de áreas pantanosas**

As hidrelétricas ajudam a melhorar a saúde dos cursos de água: por um lado, a regularização dos fluxos pode contribuir para a recuperação de áreas pantanosas, reduzindo o acúmulo de água estagnada; por outro lado, a infra-estrutura da usina retém galhos, árvores e outros objetos sólidos, facilitando a navegabilidade dos rios a jusante.

- **Valorização das áreas turísticas e dos esportes aquáticos**

Nas proximidades de um reservatório, inclusive para necessidades operacionais, são criados caminhos pedonais, que podem ser disponibilizados para uso turístico; sempre que possível, algumas represas também são disponibilizadas para ciclovias, para o turismo ciclístico: uma forma de valorizar áreas que muitas vezes são muito bonitas do ponto de vista paisagístico.

Além disso, um rio mais limpo graças a uma usina hidrelétrica também é um recurso para a pesca e esportes aquáticos como o rafting ou a canoagem. E ainda, a pesca é uma importante atividade econômica para muitas comunidades e, neste sentido, a presença de um reservatório pode ser um recurso significativo.

- **Protege a biodiversidade**

A presença de grandes massas de água em reservatórios incentiva o crescimento da vegetação, que por sua vez atrai os animais: assim, as usinas hidrelétricas muitas vezes se tornam espaços para a preservação da biodiversidade.

Com isto em mente, canais e rampas de passagem são frequentemente construídos ao lado de represas e açudes, permitindo que os peixes possam descer ou subir livremente nos cursos de água.

- **A água traz consigo uma enorme energia**

O potencial energético da energia hidrelétrica é enorme. De fato, as gigantescas massas de água em altas altitudes são dotadas de uma considerável quantidade de energia potencial gravitacional, e aproveitar até mesmo apenas uma parte dela significa ter uma abundância de energia à disposição. Basta dizer que todas as maiores usinas de produção de energia do mundo são hidrelétricas, e que pode ser necessária apenas uma usina para satisfazer inteiramente as necessidades energéticas de milhões de pessoas.

- **É a fonte mais barata**

Embora o investimento inicial na instalação de uma usina seja desafiador e caro, em geral, a energia hídrica é a menos cara em absoluto a médio e longo prazo. Criadas as barragens, realizadas as usinas e instaladas as turbinas, a manutenção necessária é mínima em comparação com o investimento inicial. E com a crescente digitalização das centrais elétricas, há maior eficiência e outros benefícios, como a redução do desperdício.

- **Está no centro de um processo de inovação constante**

As novas tecnologias fornecem máquinas cada vez mais eficientes para a energia hidrelétrica. Assim, a modernização das usinas aumenta a capacidade instalada e, portanto, a produção de eletricidade: esta é a prática da repotenciação, graças à qual as emissões de gases de efeito estufa do setor energético são ainda menores.

A tecnologia também desempenha um papel de liderança na manutenção de usinas elétricas e garante a máxima segurança.

E é sobretudo a digitalização que abre os cenários mais avançados: o monitoramento contínuo é baseado em sensores sem fio, análise estatística e manutenção preditiva, enquanto as inspeções estão se tornando cada vez mais eficientes com o uso de robôs, drones e sistemas de satélite (como o GPS) para detectar até mesmo as menores anomalias, permitindo que intervenções preventivas sejam realizadas de forma segura e eficiente.

De outro lado, as usinas hidrelétricas são frequentemente apontadas como uma força de produção de energia limpa. Porém essas unidades são responsáveis por um conjunto de impactos ambientais, que provocam uma profunda transformação do ambiente natural. A seguir, temos as principais desvantagens das usinas hidrelétricas [35]:

- Alteração das formas de vida das populações, em especial, de grupos tradicionais, como ribeirinhos, indígenas e quilombolas.
- Supressão da vegetação nativa por meio do alagamento de grandes áreas de floresta para a construção das barragens.
- Emissão de gases que intensificam o aquecimento global, como o dióxido de carbono e metano, produzidos por meio da decomposição de matéria orgânica.
- Acentuação do assoreamento dos rios devido à intensa modificação do fluxo natural da água do rio e dos seus processos hidrológicos.

- Extinção de espécies, em especial, aquáticas, as mais atingidas pela modificação do fluxo de água dos rios.
- Desequilíbrio de ecossistemas por meio da transformação das dinâmicas ambientais e da alteração de recursos naturais, como o solo, o ar e a água.

2.7 ENERGIA EÓLICA

De ponto de vista conceitual, se trata de uma energia contida na massa de ar em movimento (vento) [36].

A energia renovável do vento é aproveitada convertendo a energia cinética de translação em energia cinética de rotação através do uso de turbinas eólicas ou aerogeradores. De acordo com um estudo da Universidade de Stanford publicado no *Journal of Geophysical Research*, a quantidade de energia produzida pelo vento é cinco vezes maior do que a energia necessária na Terra, o que significa que o vento tem o potencial de suprir todas as necessidades energéticas globais [37].

Ela é proveniente do movimento das massas de ar, as quais são influenciadas pela variação de temperatura na atmosfera da Terra. Essa variação de temperatura é afetada por diversos fatores, incluindo a rotação da Terra e a direção dos raios solares. Em suma, a energia eólica pode ser considerada como uma forma de energia solar [38].

Com a crescente preocupação em relação às mudanças climáticas e à necessidade de reduzir as emissões de gases do efeito estufa, muitos países têm buscado alternativas que possam suprir suas necessidades energéticas sem impactar negativamente o meio ambiente. Dentre as opções, a energia eólica tem se destacado como uma das mais populares. O Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC) tem destacado o enorme potencial dessa fonte de energia para reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Apesar de sua distribuição não ser uniforme entre os países, a energia eólica tem um potencial técnico maior que a produção mundial de eletricidade. Estima-se que até 2050, ela poderia suprir até 20% da demanda mundial de energia elétrica. [39] No entanto, a energia eólica ainda é uma tecnologia relativamente nova e seus altos custos iniciais a tornam menos competitiva em comparação às tecnologias tradicionais disponíveis no mercado. Por isso, muitos países têm adotado políticas de apoio às energias renováveis para incentivar o investimento nessa área. Entre 2005 e 2011, o número de países que adotavam algum tipo de incentivo às fontes renováveis passou de 55 para 118 [40].

Segundo [41], em 2021, a eletricidade gerada pela energia eólica teve um aumento significativo de aproximadamente 273 TWh, o que representa um aumento de 17%. Esse crescimento é 55% maior do que o aumento observado em 2020 e é o maior entre todas as tecnologias de geração de energia. A energia eólica continua sendo a principal tecnologia renovável não hidrelétrica, gerando 1.870 TWh em 2021, quase igual à produção combinada de eletricidade de todas as outras fontes de energia renovável.

2.7.1 A energia eólica na África e no Benin

O Atlas Global do Vento (Global Wind Atlas), um aplicativo da web desenvolvido para ajudar tomadores de decisão e investidores a identificar áreas de forte potencial de vento para geração de energia em todo o mundo e realizar cálculos preliminares, identifica importantes recursos eólicos, especialmente no Saara e no Chifre da África, mas também nas costas do sul da África.

Segundo [42], o potencial da energia eólica está sendo cada vez mais reconhecido na África, com vários países investindo em parques eólicos. Atualmente, alguns maiores produtores de energia eólica na África são Marrocos, Egito e Tunísia, todos atrás da África do Sul. Em 2012, esses países tinham capacidades estimadas de produção de energia eólica de 1300 MW, 550 MW e 240 MW, respectivamente [43]. A Tunísia tinha uma capacidade de produção de energia eólica de cerca de 240 MW, com mais 128 MW em construção [44]. O gráfico abaixo mostra como a capacidade de produção de energia eólica na África cresceu desde 1997, com um aumento significativo observado a partir de 2006. A capacidade total no final de 2012 ultrapassou 2 GW, com o crescimento notável da produção de energia eólica no Marrocos sendo o principal impulsionador desse aumento significativo em 2012 (ver figura 2.14).

Segundo [25], a produção de eletricidade a partir de turbinas eólicas na África foi de 14,171 GWh em 2018, representando 1,7% da produção total do continente. A África do Sul sozinha produziu 6,467 GWh, representando 46% do total africano. A capacidade eólica instalada na África cresceu 16% em 2017, passando de 3917 MW no final de 2016 para 4538 MW no final de 2017; este aumento de 621 MW é exclusivo da África do Sul, que atingiu 2094 MW no final de 2017, representando 46% do total africano; em segundo lugar, mas muito atrás, está o Egito, com 810 MW, seguido pelo Marrocos, com 787 MW; em quarto lugar está a Etiópia, com 324 MW, seguida pela Tunísia, com 245 MW.

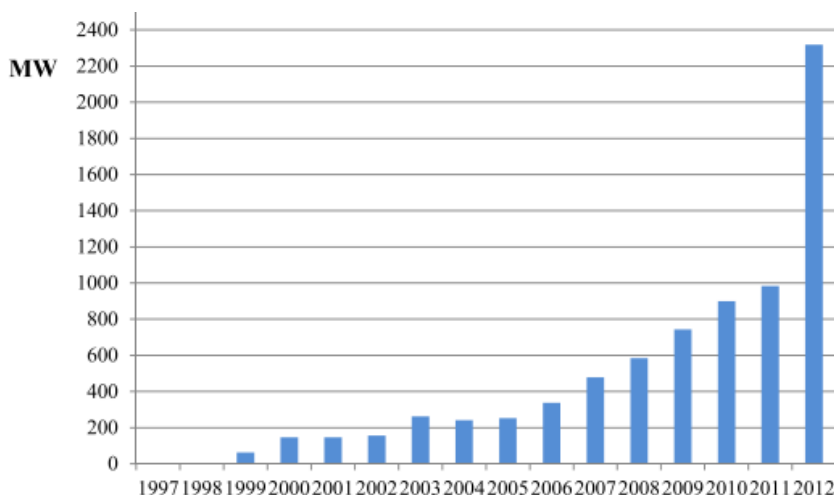


Figura 2.14: Capacidade cumulativa de energia eólica na África (Fonte:[2])

Embora a África tenha grande potencial para gerar energia eólica e tenham ocorrido alguns desenvolvimentos positivos nessa área, a capacidade instalada atual de eletricidade baseada em energia eólica na África é apenas 0,4% da capacidade global. Isso indica uma grande lacuna entre o potencial e a utilização real da energia eólica na África, o que levanta questões sobre as barreiras que estão impedindo o

desenvolvimento desse setor no continente. Além disso, a falta de informações detalhadas sobre projetos individuais de energia eólica torna ainda mais difícil para os formuladores de políticas e desenvolvedores obterem uma compreensão abrangente do mercado.

No Benin atualmente, infelizmente, nada consta no que diz respeito à exploração à grande escala do potencial da energia eólica no país apesar da existência de vários estudos sobre o potencial eólico do país.

2.7.2 Funcionamento de um parque eólico

As turbinas do parque eólico são conectadas umas às outras por meio de um duto de cabos subterrâneo. A instalação eólica recebe uma cabine de distribuição: a energia renovável produzida é transportada para lá e, por sua vez, é alimentada à rede elétrica para atender às necessidades de energia sustentável de famílias e empresas.

Ao contrário do que se possa imaginar, um parque eólico ocupa uma porção de terra muito pequena comparativamente à quantidade de energia renovável que é capaz de produzir. De acordo com *um processamento de dados de 2020 referente à Itália*[45], toda a capacidade eólica necessária para atender aos objetivos do Plano Nacional de Energia para o ano de 2030 ocuparia uma área igual à província de Prato, a menor do país.

2.7.3 Tipos de Parques eólicos

Segundo um artigo da Enel Green Power⁸, um parque eólico é uma área especialmente projetada para a produção de energia a partir da força dos ventos. Essa área contém vários geradores eólicos que têm capacidades de geração de energia que variam de 600 kW a 5 MW e são instalados estrategicamente para aproveitar ao máximo as condições eólicas locais.

Existem três tipos de parques eólicos: o parque eólico on-shore (em terra, a pelo menos 3 km da costa) é o mais comum, enquanto o near-shore (a menos 3 km de distância da costa) e o off-shore (em lagos ou em alto-mar, a muitos quilômetros da costa) são menos comuns e localizados onde a presença de parques eólicos não constitui um obstáculo para atividades pré-existentes ou rotas importantes de navegação.

- **Os parques eólicos onshore**

Os parques eólicos onshore são instalações que produzem eletricidade a partir da força do vento em locais terrestres (2.15).

⁸multinacional italiana, que atua no ramo de geração e distribuição de eletricidade e gás a partir de fontes renováveis.



Figura 2.15: Um parque eólico On-shore (Fonte:<https://www.iberdrola.com>)

Eles são compostos por uma variedade de componentes que convertem a energia cinética do vento em eletricidade através do princípio de funcionamento seguinte:

A energia elétrica é gerada no aerogerador. Trata-se de uma estrutura que se sustenta sobre uma fundação de concreto armado para garantir sua estabilidade e funcionalidade. Conta com um controlador que se encarrega de iniciar e parar a turbina de acordo com as condições climáticas, assim como tem um mecanismo que determina a direção do vento e permite que se oriente corretamente. A torre cuja altura depende da orografia do terreno é dotada de um sistema de balizagem, com luzes e cores específicas que fazem com que seja altamente visível ao tráfego aéreo a fim de conseguir a máxima segurança.

A força do vento faz girar as pás do aerogerador, que foram projetadas para captarem ao máximo essa energia cinética: podem mover-se inclusive com ventos muito suaves, desde 11 quilômetros por hora. As pás estão unidas à turbina através da bucha, que por sua vez está conectada ao eixo lento, que gira na mesma velocidade das pás (entre 7 e 12 rotações por minuto). Uma multiplicadora eleva essa velocidade mais de 100 vezes e a transfere para o eixo rápido, que se move a mais de 1.500 rotações por minuto. Tal força é transmitida ao gerador (algumas tecnologias utilizam geradores de baixa velocidade acoplados diretamente ao eixo lento), onde a energia cinética se transforma em energia elétrica. E daí passa ao conversor, que a transforma em corrente alternada.

A energia elétrica gerada é de baixa tensão, sendo conduzida para um transformador que a eleva para média tensão (entre 20 e 66 kV) permitindo que seja transmitida ao parque. A partir daí é conduzida para a subestação, que converte a energia em corrente de alta tensão (mais de 132 kV). Essa eletricidade, já apta para o consumo, é transferida através da linha de evacuação (geralmente aérea) para as instalações ligadas à rede de distribuição, que a leva finalmente às residências (ver figura 2.16) [46].

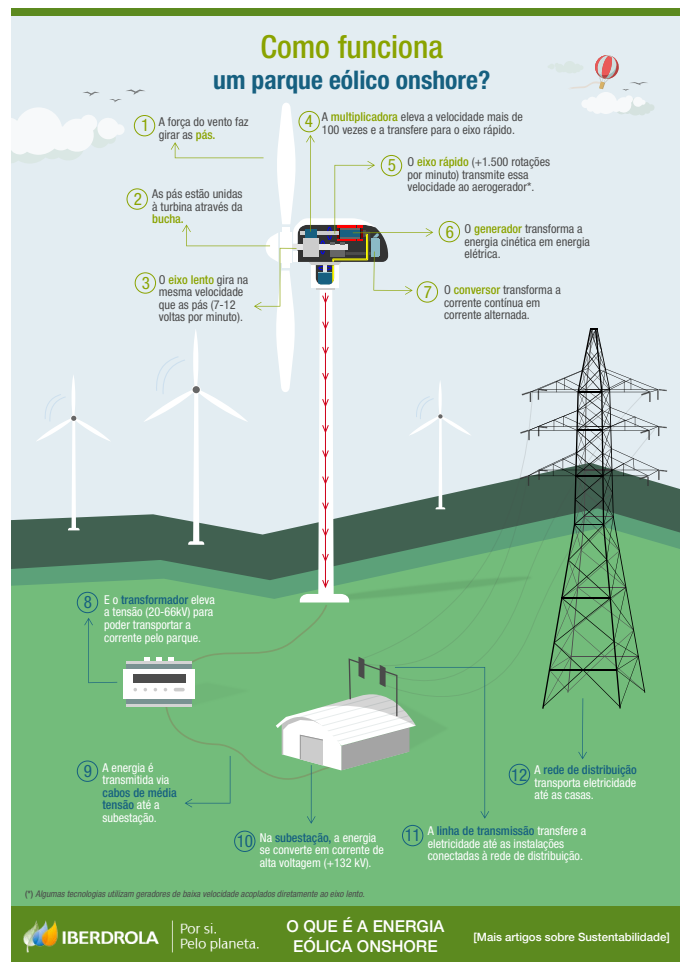


Figura 2.16: Funcionamento de um parque eólico On-shore (Fonte: <https://www.iberdrola.com>)

Quanto ao local de instalação dos parques eólicos, normalmente eles são instalados em áreas rurais despovoadas, isoladas dos núcleos populacionais, para evitar que o ruído incomode os habitantes.

No momento de escolher a localização de um parque eólico onshore, é necessário considerar várias questões:

- *O impacto ambiental.*
- *O potencial energético da zona.*
- *A variação espacial, temporária e vertical do vento ao longo dos anos.*
- *As condições geológicas e geotécnicas da localização.*
- *A viabilidade ambiental, legal e territorial, assim como a acessibilidade ao lugar.*

Existem ferramentas e modelos meteorológicos que permitem determinar tais aspectos quais os locais mais adequados para instalar os aerogeradores e estimar, antes da construção de um parque eólico, qual será a capacidade de geração durante toda a sua vida útil.

- **Os parques eólicos Offshore**

A energia eólica offshore é gerada a partir da força do vento em alto-mar, onde sua velocidade é maior e constante devido à falta de obstáculos. Para explorar esse recurso de forma mais eficiente, são construídas grandes estruturas que ficam presas no fundo do mar e são equipadas com tecnologias avançadas (ver Figura 2.17) [47].



Figura 2.17: Um parque eólico Off-shore (Fonte:<https://www.iberdrola.com>)

A Figura 2.18 a seguir ilustra o princípio de funcionamento de um parque eólico Off-shore:

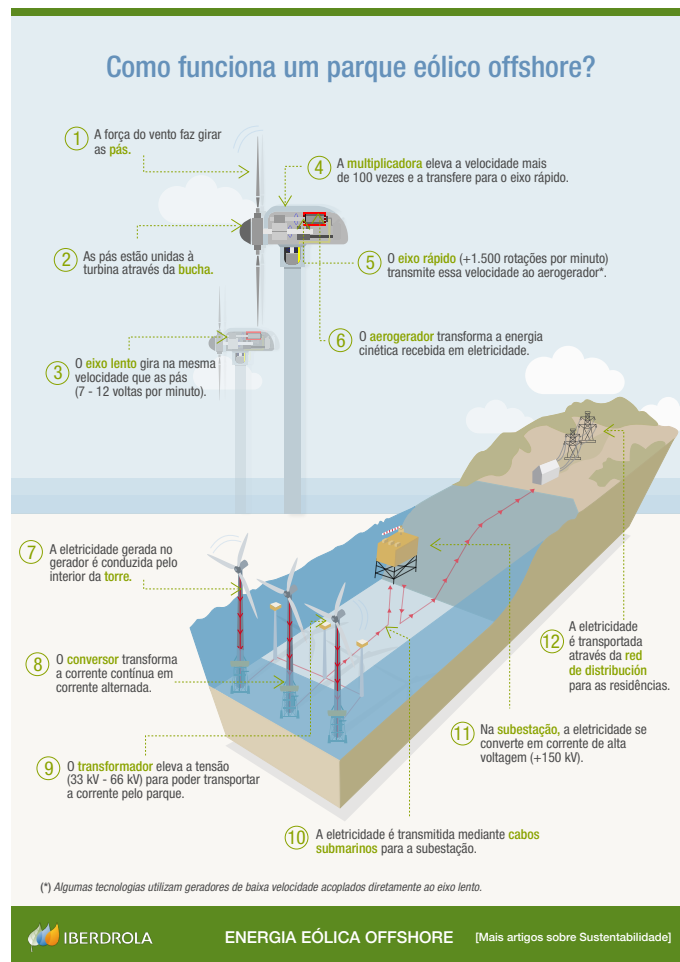


Figura 2.18: Funcionamento de um parque eólico Off-shore (Fonte: <https://www.iberdrola.com>)

2.7.4 Distribuição de Weibull

Através de análises estatísticas de séries de dados de velocidade do vento ao longo de vários anos, foi possível observar que a probabilidade de ocorrência dessas velocidades segue padrões previsíveis, que podem ser descritos matematicamente através de equações. A função de probabilidade de Weibull é a mais comum e amplamente utilizada para representar esse comportamento das velocidades do vento. Essa função é representada pela equação 2.22

$$f(v) = \frac{k}{c} \times \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \times e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.22)$$

com:

$$\begin{cases} c = \frac{1.125 \cdot v}{1-B} \\ k = 1 + 0.482(v - 2)^{0.51} \\ B = 1 - 0.81(v - 1)^{0.089} \end{cases}$$

2.7.5 Potência disponível

A potência é a medida da quantidade de energia que é transferida ou transformada em um determinado intervalo de tempo. No caso da energia eólica, a potência disponível P_{disp} no vento que passa por uma seção transversal de área A pode ser determinada pela derivada da expressão da energia cinética em relação ao tempo, de acordo com a equação (2.23). Essa equação permite calcular a quantidade de potência que pode ser extraída do vento em um determinado momento, levando em conta as características da seção transversal onde a energia está sendo captada.

$$P_{disp} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.23)$$

Onde:

- P_{disp} é a potência disponível no vento fluindo (em Watt - W);
- A é a Área varridas pelas pás do aerogerador em movimento (em metro quadrado - m^2)
- v e a velocidade do vento. (em metro por segundo - m/s);

Observando a equação (2.23), podemos perceber que a quantidade de energia disponível no vento está diretamente relacionada ao cubo da velocidade do vento. Isso significa que a quantidade de energia é muito sensível à velocidade do vento. Se a velocidade do vento aumentar duas vezes, a quantidade de energia disponível aumenta em oito vezes. Por isso, é importante que haja um fluxo de vento constante e forte para aproveitar a energia eólica de forma eficiente.

A potência gerada por uma turbina eólica é limitada, pois nem toda a energia disponível no vento pode ser aproveitada. Em 1919, o físico Albert Betz demonstrou que há um limite para a eficiência dos conversores de energia eólica na extração da energia do vento [48]. Isso ocorre porque a energia mecânica só pode ser extraída à custa da energia cinética contida no vento, o que leva a uma diminuição da velocidade do ar atrás da turbina eólica. Essa redução na velocidade do ar afeta a quantidade de energia que pode ser extraída, pois a energia disponível no vento está diretamente relacionada à sua velocidade. Portanto, existe um limite teórico para a quantidade de energia que pode ser extraída do vento, que é conhecido como o limite de Betz. É necessário, então, considerar as condições tanto à frente quanto atrás do conversor de energia para maximizar a eficiência da extração de energia eólica [49].

2.7.6 Potência recuperada

A potência Recuperada P_{recup} , é a potência remanescente após ter levado em consideração a redução da velocidade do vento atrás da turbina; ou seja, se trata da potência que é de fato extraída do vento. Para poder fazer uma quantificação mais próxima possível do valor real desta potência, é preciso falar da Distribuição de Weibull que é a função de densidade de probabilidade que melhor representa a distribuição de velocidades do vento, conforme se observa na Figura (2.19) [50], [51].

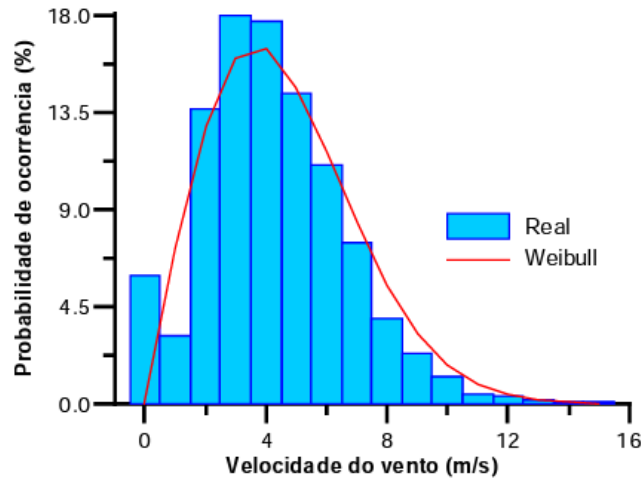


Figura 2.19: Distribuição de probabilidade de ocorrência de velocidades: real VS estimada. (Fonte:Tirado de [3])

Segundo [52], a potência recuperada P_{recup} por unidade de surface é dada pela expressão da equação 2.24 a seguir:

$$P_{recup} = P_{disp} \times C_r = C_r \times \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^3 \quad (2.24)$$

Onde:

- P_{disp} é a potência disponível no vento fluindo por unidade de surface (em Watt - W);
- C_r é o limite demonstrado pelo físico Betz (adimensional)
- v_m^3 é a média cúbica da velocidade (em metro por segundo - m/s)

A n-ésima velocidade média do vento é dada pela equação 2.25 segundo [53] e [54] citado em [52]:

$$v_m^n = \int_0^{\infty} v^n \times f(v) \times dv = c^n \times \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (2.25)$$

Desta forma, temos:

$$v_m^3 = \int_0^{\infty} v^3 \times f(v) \times dv = c^3 \times \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (2.26)$$

Substituindo os valores de c e k da equação 2.22 e o valor de v_m^3 da equação 2.26 acima na equação da potência recuperada, obtemos:

$$P_{recup} = \frac{1}{2} \times \rho \times C_r \times \left(\frac{1.125 \cdot v}{0.81(v-1)^{0.089}} \right)^3 \times \Gamma\left(\frac{4 + 0.483(v-2)^{0.51}}{1 + 0.483(v-2)^{0.51}} \right) \quad (2.27)$$

Segundo [55] e [56], mencionado por [52] no seu trabalho, o limite da Lei de Betz é de $\frac{16}{27}$ ou cerca de 0,59, o que significa que nenhuma turbina eólica pode ter uma eficiência superior a cerca de 59% da energia cinética do vento. O coeficiente de potência das turbinas eólicas (C_p) $\in [0.35, 0.45]$, o que é um valor típico para as turbinas eólicas modernas.

2.7.7 Vantagens e desvantagens da energia Eólica

- **Vantagens:**

A seguir são listadas as principais vantagens e desvantagens relacionadas à energia eólica segundo [57] e [58]

- As fontes de energia renovável eólica são altamente valorizadas por serem limpas, seguras e inesgotáveis, e por ajudarem a reduzir a dependência de combustíveis fósseis, o que contribui para mitigar as mudanças climáticas e avançar na transição energética.

- A conversão de energia eólica em eletricidade alcançou um bom desempenho, com eficiências variando entre 40% e 50%, o que é próximo do limite máximo teórico de eficiência de 59%, estabelecido pela Lei de Betz. No entanto, muitas vezes optamos por uma eficiência inferior devido a restrições financeiras associadas aos custos de instalação.

- Uma usina eólica não ocupa muito espaço no solo, pois suas pás são instaladas em altura e têm uma base de dimensão relativamente pequena. Isso significa que a produção de energia eólica pode coexistir com outras atividades que utilizam a mesma área, ao contrário das instalações fotovoltaicas, que exigem mais espaço no solo.

- Além disso, essas fontes de energia produzem poucos resíduos e não emitem gases tóxicos ou radiações prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente.

- A mobilidade dos equipamentos eólicos permite que a área em que estão instalados possa ser recuperada após o desmantelamento; ou seja as usinas eólicas são altamente reversíveis, o que significa que no final de seu ciclo de vida, é possível recuperar quase todos os recursos utilizados em sua construção. O terreno pode ser restaurado completamente, as instalações podem ser desmontadas em seus componentes básicos e os materiais utilizados podem ser reciclados para a criação de novas usinas, seguindo um modelo de economia circular.

- Os custos de manutenção desses equipamentos são baixos e não interferem nas atividades agrícolas e pecuárias ao redor dos parques eólicos.

- Outra vantagem é a criação de postos de trabalho decorrentes da instalação e manutenção desses equipamentos. De acordo com o relatório *Energia eólica na Europa: cenários para 2030 da WindEurope*, publicado em setembro de 2017, a indústria da energia eólica proporcionará 569.000 empregos até 2030.

- Reduz a elevada dependência energética do exterior, nomeadamente a dependência em combustíveis fósseis;

- Poupança devido à menor aquisição de direitos de emissão de CO₂ por cumprir o protocolo de Quioto e directivas comunitárias e menores penalizações por não cumprir;

- Possível contribuição de cota de GEE para outros sectores da actividade económica;
- É uma das fontes mais baratas de energia podendo competir em termos de rentabilidade com as fontes de energia tradicionais.

- **Desvantagens**

As principais desvantagens deste tipo de energia são:

- A produção de energia eólica é intermitente, o que significa que nem sempre há vento quando é necessário gerar eletricidade, tornando difícil integrá-la de forma consistente no programa de produção de energia.
- Com as pilhas de combustível (H_2) ou com a técnica da bombagem hidroelétrica, ela pode se mostrar obsoleta.
- A instalação de parques eólicos tem um impacto visual significativo na paisagem e pode ser uma preocupação para os moradores locais.
- A presença de turbinas eólicas pode ter efeitos negativos sobre as aves locais, especialmente devido a colisões com as pás eólicas, além de potencialmente afetar seu comportamento de migração.
- As turbinas eólicas geram um ruído constante, com um nível de 43 dB (A), o que pode ser um problema para habitações e áreas residenciais localizadas a menos de 200 metros de distância.

2.8 BIOENERGIA

A bioenergia é uma forma de energia obtida a partir da biomassa, que é composta por materiais orgânicos renováveis, como resíduos agrícolas, florestais e urbanos, além de culturas energéticas, como a cana-de-açúcar e o milho.



Figura 2.20: Imagem ilustrativa da criação da bioenergia (Fonte:<https://brasilecola.uol.com.br>)

Ela é uma forma de energia que pode ser usada para gerar calor, combustível ou eletricidade. Para compreender o significado desse tipo de energia, é necessário ter conhecimento sobre a biomassa, já que é a partir dela que a bioenergia é produzida.

2.8.1 Biomassa

Segundo o site Brasil Escola [59], a Biomassa é o termo utilizado para descrever toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal que pode ser utilizada para gerar energia, tanto térmica quanto elétrica, e para produzir biocombustíveis. Seu principal objetivo é a produção de bioenergia, tanto de forma direta quanto indireta.

Biomassa é composta por materiais de origem animal ou vegetal que são utilizados para a produção de energia. Ela é proveniente de diversas fontes, como plantas lenhosas, culturas agrícolas e resíduos industriais e urbanos.

2.8.2 Como funciona a Biomassa?

A biomassa é composta por uma grande variedade de elementos, o que possibilita diversas formas de conversão em energia ou em subprodutos, como biocombustíveis. O processo de produção de energia a partir da biomassa inicia-se na natureza por meio da fotossíntese, na qual a energia solar é utilizada pelas plantas para produzir glicose. Essa energia é, então, convertida em outras formas energéticas, como calor e eletricidade, através de processos diretos, como a combustão, ou indiretos, como a conversão termoquímica [59].

Utiliza-se principalmente a combustão direta e a conversão termoquímica para produção de energia a partir da biomassa.

As usinas termelétricas utilizam o bagaço de cana-de-açúcar e pedaços de madeira como combustível para gerar eletricidade. Esse processo ocorre através da queima do bagaço e da madeira, que aquece a água na caldeira até o ponto de vaporização. O vapor gerado é responsável por acionar as turbinas do gerador elétrico, que produz eletricidade. Algumas usinas utilizam carvão mineral em conjunto com a biomassa, em um processo conhecido como co-combustão, a fim de reduzir o consumo de combustíveis fósseis.

Os biocombustíveis são produzidos por meio de um processo termoquímico, que envolve as reações de pirólise, que quebram a biomassa pelo fogo para produzir líquidos e gases, e a gasificação, que aquece a biomassa no estado sólido, em presença de oxigênio e vapor, para produzir produtos em estado gasoso.

Antes de ser utilizada na geração de energia, determinados tipos de biomassa precisam passar pelo processo de torrefação para remover o excesso de umidade.

A biomassa é utilizada para produzir bioenergia e essa forma de energia é renovável, limpa e de baixo custo, não emitindo gases poluentes na atmosfera durante sua produção. Mesmo que haja liberação de gás carbônico na queima da biomassa, ele é reutilizado pelas plantas no processo de fotossíntese, não afetando o equilíbrio do ambiente.

Existem três tipos de biomassa:

- **sólida**
- **líquida**
- **gasosa**

A biomassa sólida é proveniente de resíduos agrícolas, florestais e biodegradáveis das indústrias e áreas urbanas.

A biomassa líquida é obtida a partir de culturas energéticas e resulta em biocombustíveis líquidos, como etanol e biodiesel.

Já a biomassa gasosa pode ser encontrada em efluentes agropecuários das indústrias e áreas urbanas.

O uso da biomassa como fonte de energia tem se tornado mais comum, principalmente com a exaustão de fontes não renováveis. Isso a torna uma alternativa à matriz energética mundial. Além disso, a produção de bioenergia é uma forma de responder ao apelo da comunidade científica por uma energia mais sustentável e menos prejudicial ao meio ambiente [60].

É possível obter energia a partir de resíduos sólidos urbanos por meio de tecnologias avançadas de tratamento e aproveitamento de lixo. Essas tecnologias incluem processos como incineração, digestão anaeróbica, pirólise e gaseificação.

A **incineração** envolve a queima controlada do lixo, gerando energia térmica que pode ser convertida em energia elétrica. A digestão anaeróbica é um processo biológico que trata resíduos orgânicos, como restos de alimentos e dejetos animais, para produzir biogás.

A **pirólise** é um método que utiliza alta temperatura em um ambiente sem oxigênio para transformar o lixo em gás combustível, líquido ou sólido.

Já a **gaseificação** é um processo que ocorre em um ambiente controlado com alta temperatura e pressão, transformando o lixo em gás combustível.

É importante destacar que, para garantir a sustentabilidade, a energia gerada a partir de resíduos sólidos urbanos deve ser produzida de maneira ambientalmente responsável, levando em consideração aspectos como controle de emissões e tratamento adequado dos resíduos[61].

2.8.3 A bioenergia na África

A bioenergia, que se refere a todos os combustíveis provenientes de biomassa, é a fonte mais importante de energia renovável. A proporção de bioenergia em alguns países em desenvolvimento ultrapassa os 90% do seu abastecimento de energia primária. A bioenergia é uma opção essencial de energia para uma ampla variedade de aplicações, e será uma importante fonte de energia na maioria dos países em desenvolvimento no futuro previsível. No entanto, a atual exploração da bioenergia na África é insustentável e ineficiente. Cerca de 65% dos africanos dependem da biomassa tradicional para cozinhar. A maioria dessas populações vive em áreas rurais. Associada a níveis de eficiência de apenas 10 – 20% para a combustão de biomassa, o uso de bioenergia na África tem exacerbado os impactos ambientais, especialmente em termos de desmatamento. O uso de bioenergia para cozinhar ampliou os problemas de saúde e mortalidade devido

à poluição do ar interior que ela causa. No entanto, existe um enorme potencial para o desenvolvimento de biocombustíveis modernos e mais eficientes na África. A bioenergia tem o maior potencial de expansão entre as tecnologias de energia renovável, principalmente porque a tecnologia é madura e constitui um substituto relativamente fácil para os combustíveis fósseis.

A bioenergia tem um potencial importante para mitigar o efeito estufa, desde que os recursos sejam desenvolvidos de forma sustentável e sejam utilizados sistemas bioenergéticos eficientes. Alguns sistemas e oportunidades futuras chave, incluindo sistemas de cultivo perenes, uso de resíduos e biomassa, bem como sistemas de conversão avançados, são capazes de permitir reduções de emissões de 80 a 90% em relação à linha de base de energia fóssil. A mitigação a partir da bioenergia envolve opções como a mudança de combustível do diesel ou óleo pesado para biodiesel, a mudança de combustível do carvão para biomassa e a produção de eletricidade a partir de resíduos sólidos e líquidos municipais. Embora a África tenha um vasto potencial de produção bioenergética, esse potencial não foi explorado devido à incapacidade de desenvolver e implementar políticas adequadas, regulamentações e disposições institucionais inadequadas e à falta de coordenação efetiva entre as autoridades nacionais e locais [62].

2.8.4 Como funcionam as usinas de de incineração de resíduos ou usinas de recuperação energética de resíduos?

As usinas de energia a partir de resíduos queimam resíduos sólidos municipais, frequentemente chamados de lixo, para produzir vapor em uma caldeira, e o vapor é usado para alimentar uma turbina geradora de eletricidade.

O resíduo sólido municipal é uma mistura de materiais ricos em energia, como papel, plásticos, resíduos de jardim e produtos feitos de madeira. Para cada cerca de 45 kg de lixo municipal nos Estados Unidos, cerca de 38 kg podem ser queimadas como combustível para gerar eletricidade. As usinas de energia a partir de resíduos reduzem 907 kg de lixo em cinzas que pesam entre 136 e 272 kg, e reduzem o volume de resíduos em cerca de 87%.

Os resíduos sólidos ou lixo podem ser transformados em uma valiosa fonte de energia por meio de processos de conversão térmica ou biológica. Na conversão térmica, os resíduos são submetidos a um processo controlado de queima, gerando vapor que pode ser utilizado para a produção de eletricidade. Já na conversão biológica, os resíduos são decompostos por microrganismos em condições anaeróbicas, resultando na produção de biogás, um combustível aproveitável.

Além de gerar energia, o aproveitamento de resíduos sólidos como fonte energética tem um potencial significativo para reduzir a quantidade de lixo destinada aos aterros sanitários. Isso contribui para a preservação do meio ambiente e a diminuição dos impactos negativos causados pela disposição inadequada de resíduos.

O sistema de conversão de resíduos em energia mais comum nos Estados Unidos é o sistema de queima em massa. Nesse sistema, os resíduos não processados são queimados em um grande incinerador com uma caldeira e um gerador para produzir eletricidade (veja a ilustração abaixo na figura 2.21).

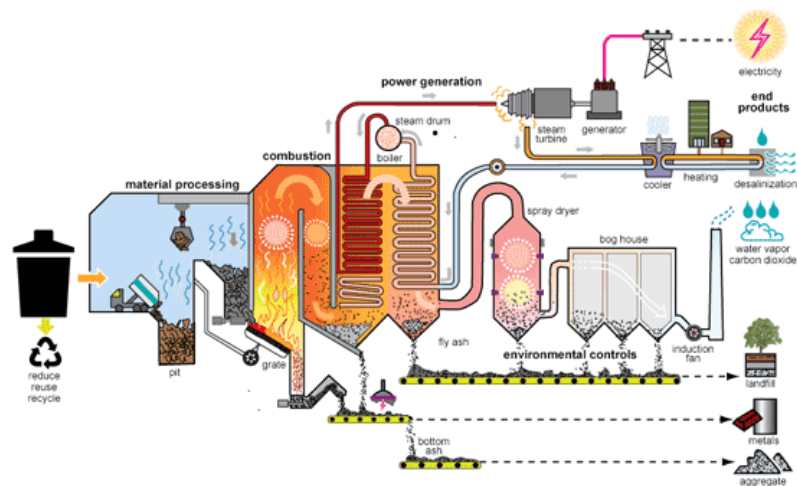


Figura 2.21: Funcionamento de uma usina de transformação de lixo em eletricidade (Fonte: U.S. Energy Information Administration - EIA)

O processo de geração de eletricidade em usina de valorização energética de resíduos por queima em massa tem sete etapas:

1. Os resíduos são despejados dos caminhões de lixo em uma grande vala.
2. Uma garra gigante em uma grua agarra o lixo e o despeja em uma câmara de combustão.
3. O lixo (combustível) é queimado, liberando calor.
4. O calor transforma água em vapor em uma caldeira.
5. O vapor de alta pressão faz girar as pás de uma turbina geradora para produzir eletricidade.
6. Um sistema de controle de poluição do ar remove os poluentes do gás de combustão antes de ser liberado através de uma chaminé.
7. As cinzas são coletadas da caldeira e do sistema de controle de poluição do ar.

Uma unidade piloto de usina industrial é empregada para testar a viabilidade técnica e econômica da geração de energia a partir de resíduos sólidos. Essa unidade é construída em escala reduzida em comparação com uma usina de grande porte, possibilitando a avaliação dos impactos ambientais e das condições operacionais do processo de tratamento e geração de energia. Nessa fase, são realizadas análises do desempenho da tecnologia, das emissões de gases poluentes, da qualidade da energia produzida e da eficiência energética, entre outros aspectos. Além disso, a unidade piloto serve como referência para o desenvolvimento de uma usina industrial em escala completa, permitindo ajustes e aprimoramentos no processo antes da implementação em larga escala[61].

2.8.4.1 Vantagens

É uma forma de energia sustentável, proveniente de fontes renováveis. Emite poucos poluentes em comparação com fontes não renováveis de energia. Apresenta baixo custo e oferece oportunidades de reaproveitamento de resíduos. Apresenta menor impacto ambiental em comparação a outras fontes de energia. Não contribui para o aumento do efeito estufa[60].

2.8.4.2 Desvantagens

Pode levar ao desmatamento de extensas áreas, resultando em perda de habitat, desequilíbrio ecológico e alterações climáticas. Tem menor poder calorífico quando comparado a outros combustíveis. O transporte e armazenamento de biomassa sólida podem ser mais desafiadores. Apresenta eficiência reduzida em algumas aplicações. Biocombustíveis líquidos podem contribuir para o aumento das chuvas ácidas[60].

2.8.4.3 Desafios

A bioenergia enfrenta dois problemas ambientais: a remoção da cobertura vegetal para a produção agrícola e o consumo de grandes quantidades de água.

Outra preocupação é a demanda por alimentos, que pode ser afetada pela produção agrícola destinada à geração de energia.

Portanto, é responsabilidade da sociedade e dos governos encontrar maneiras de aumentar o uso da bioenergia sem causar grandes impactos negativos ao meio ambiente e sem comprometer a produção de alimentos[60].

2.8.5 Geração Distribuída

Diante da ampla variedade de conceitos existentes, é necessário adotar uma definição padrão que sirva como referência para as análises e considerações deste trabalho. Sendo assim, segundo [63], fazendo referência ao documento do IEEE⁹, estabelece-se que a geração distribuída (GD) é caracterizada como uma fonte geradora de energia cuja produção é principalmente destinada a cargas locais ou próximas, dispensando o transporte da energia por meio da rede de transmissão. Além disso, a GD possui flexibilidade em termos de sua localização física, permitindo sua mobilidade conforme necessário.

Incentivar a geração distribuída (GD) é uma estratégia importante para promover a transição para um sistema energético mais sustentável. Uma maneira eficaz de fazer isso é promover a instalação de sistemas de geração de energia renovável em pequena escala, como sistemas solares residenciais e pequenas usinas eólicas.

Ao incentivar a GD, estamos possibilitando que os cidadãos tenham um papel ativo na produção de energia. Os sistemas solares residenciais permitem que os proprietários gerem sua própria eletricidade a partir do sol, reduzindo sua dependência de fontes convencionais de energia e diminuindo as emissões de

⁹Institute of Electrical and Electronics Engineers

gases de efeito estufa. Da mesma forma, as pequenas usinas eólicas permitem que comunidades locais aproveitem o vento como uma fonte limpa e renovável de energia.

Além de contribuir para a redução das emissões de carbono, a GD diversifica a matriz elétrica de um país. Em vez de depender exclusivamente de grandes usinas de energia centralizadas, a GD incorpora uma variedade de fontes de energia renovável em diferentes locais. Isso aumenta a resiliência do sistema elétrico, tornando-o menos vulnerável a interrupções e falhas em uma única fonte de energia.

Ao promover a GD, é necessário implementar políticas e incentivos que facilitem a instalação e o acesso a esses sistemas. Isso pode incluir programas de financiamento e subsídios, tarifas de alimentação (feed-in tariffs) que incentivem a venda de energia excedente para a rede elétrica, simplificação dos processos de licenciamento e conexão à rede, e educação pública sobre os benefícios da geração distribuída.

O incentivo à GD, favorece a democratização da energia, permitindo que mais pessoas tenham acesso a fontes limpas e renováveis de eletricidade. Isso não apenas impulsiona a transição para um futuro mais sustentável, mas também fortalece a participação dos cidadãos na construção de um sistema energético mais resiliente e responsável[64].

2.9 OS PRINCIPAIS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O armazenamento eficiente de energia desempenha um papel crucial na transição para uma matriz energética descarbonizada. Ele permite a flexibilização da produção de energia renovável e garante sua integração no sistema elétrico. É importante identificar os sistemas de armazenamento mais eficientes e aquele que tem o potencial de impulsionar com mais força essa transição necessária para um sistema elétrico livre de emissões.

Além de facilitar a integração das energias renováveis, o armazenamento energético também melhora a eficiência do sistema elétrico como um todo.

Embora a geração, transmissão e transformação de energia elétrica sejam relativamente fáceis, o armazenamento prático, fácil e acessível tem sido um desafio. Isso significa que a geração de energia elétrica deve ocorrer de acordo com a demanda, e as fontes renováveis, que muitas vezes são intermitentes, precisam do suporte de sistemas de armazenamento para se integrarem de maneira eficaz. Isso evita o desperdício de energia limpa durante os períodos de baixa demanda e aumenta a eficiência e segurança do sistema elétrico.

As fontes de energia renovável, como a energia solar e eólica, apresentam forte intermitência, o que significa que a sua geração de energia pode variar ao longo do tempo, muitas vezes não coincidindo com a demanda de energia dos consumidores. Para lidar com essa questão, é necessário armazenar a energia produzida em momentos de excesso ou para solucionar problemas relacionados à oferta e demanda de energia elétrica, especialmente nos períodos em que a geração é insuficiente para atender a demanda ou durante os ciclos de baixa produção afim de disponibilizá-la posteriormente quando houver demanda. Dessa forma, os sistemas de armazenamento de energia são fundamentais para a viabilidade dessas fontes de energia renovável.

Em um mundo em transição das energias fósseis para fontes renováveis, como a energia eólica e solar, melhorar o armazenamento de energia elétrica se torna vital para apoiar essas tecnologias. Isso garante que as redes elétricas estejam equilibradas e maximiza a utilização de cada megawatt gerado a partir de fontes verdes [65].

Existem diversos sistemas de armazenamento de energia que podem ser utilizados para essa finalidade, cada um com suas vantagens e desvantagens. Entre os principais sistemas de armazenamento de energia estão:

- as baterias;
- sistemas de armazenamento de energia térmica;
- os sistemas de armazenamento de ar comprimido;
- usinas hidrelétricas reversíveis;
- volantes de inércia;
- produção de hidrogênio;
- supercapacitores e outros.

As baterias, em particular, possuem vantagens como portabilidade, escalabilidade, instalação e velocidade de resposta, tornando-as uma solução versátil para a geração de energia e aprimoramento da gestão da rede de transmissão e distribuição de energia elétrica. Além disso, as baterias são uma das melhores opções para garantir a confiabilidade de sistemas isolados de geração e distribuição de energia elétrica [66].

Devido à impossibilidade de armazenar energia elétrica diretamente, é necessário convertê-la em outros tipos de energia, como energia mecânica ou química, para possibilitar seu armazenamento. Os sistemas de armazenamento de energia desempenham um papel crucial em toda a cadeia de suprimentos, agregando valor aos diferentes segmentos.

Com base em sua capacidade, os sistemas de armazenamento de energia podem ser classificados em três categorias principais como mostrado na figura 2.22:

1. Armazenamento em grande escala, que é utilizado em locais que lidam com gigawatts (GW) de energia;
2. Armazenamento em redes e ativos de geração, que operam em escalas de megawatts (MW); e
3. Armazenamento de usuário final, que é empregado em níveis residenciais e possui capacidade em kilowatts (kW).

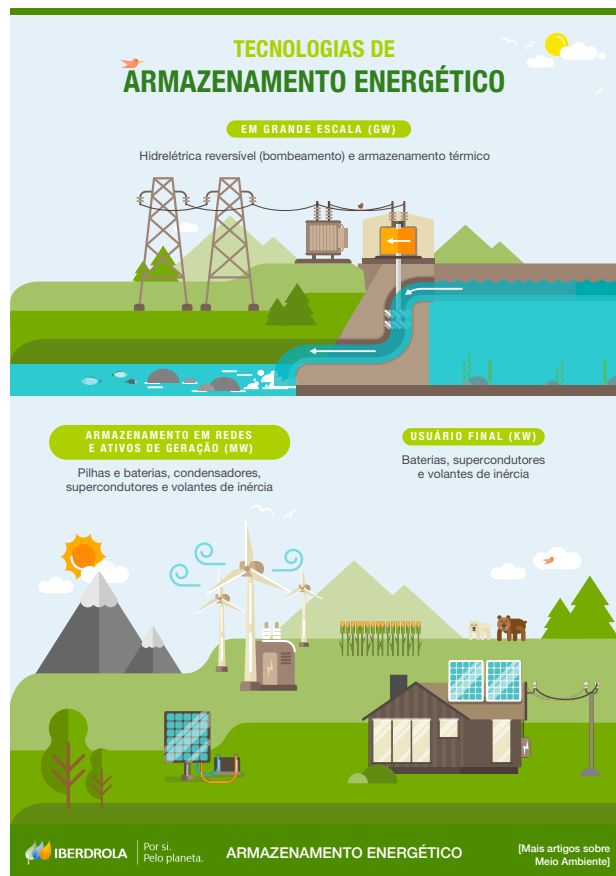


Figura 2.22: Tecnologias de armazenamento energético. (Fonte: Iberdrola - [4])

Cada uma dessas categorias atende a diferentes necessidades e demandas de armazenamento de energia em diferentes níveis da cadeia de suprimentos.

Nas próximas seções, serão apresentados os princípios de funcionamento e as características de cada um desses sistemas de armazenamento de energia para as fontes de energia renovável.

2.9.1 Baterias

Segundo *Ana Sofia Santos* em sua tese [67], as baterias são amplamente utilizadas como sistemas de armazenamento de energia devido à sua diversidade e capacidade de acumulação. Existem vários tipos de tecnologia de baterias disponíveis para diferentes aplicações, sejam elas estacionárias ou móveis. Essa versatilidade permite que as baterias armazenem quantidades variadas de energia por diferentes períodos de tempo. É necessário continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento para melhorar o desempenho das baterias existentes e desenvolver novas tecnologias, tanto para aplicações móveis quanto estacionárias, como sistemas de emergência e armazenamento de energia renovável em áreas isoladas.

O funcionamento das baterias é baseado em células compostas por um eletrólito líquido ou sólido, que permite a transferência de elétrons entre os eletrodos durante as cargas e descargas. Durante a descarga, o eletrodo negativo (ânodo) libera elétrons para o circuito externo, enquanto o eletrodo positivo (cátodo) recebe elétrons provenientes do circuito externo. Ao aplicar uma tensão aos terminais da bateria, é possível

reverter a reação e recarregar o sistema. Diferentes combinações de ânodo, cátodo e eletrólito são utilizadas, dependendo do objetivo da bateria e da sua aplicação, visando obter melhor desempenho em termos de temperatura de operação, número de ciclos, tempo de descarga, entre outros.

2.9.1.1 Sistemas de armazenamento com baterias de lítio

A maioria dos sistemas de armazenamento de energia em operação atualmente utiliza baterias de íons de lítio. Essas baterias fazem parte de um conjunto diversificado de tecnologias que têm em comum o uso de íons de lítio para armazenar energia. Os íons de lítio são partículas carregadas positivamente que têm a capacidade de reagir facilmente com outros elementos.

As baterias de lítio são compostas por um eletrodo positivo (cátodo de lítio) e um eletrodo negativo (ânodo de carbono), permitindo o armazenamento e liberação de energia por meio de reações químicas. Essas baterias são amplamente utilizadas para armazenar a energia gerada por fontes renováveis. Elas possuem diversas características tecnológicas vantajosas, como modularidade, alta densidade de energia e eficiência de carregamento e descarregamento acima de 90% no nível do módulo individual.

Nos últimos anos, a tecnologia NMC (níquel, manganês e cobalto) passou por uma transformação significativa, com um aumento na produção e uma queda significativa nos preços. De acordo com dados da Bloomberg, os preços dessa tecnologia reduziram aproximadamente 85% entre 2010 e 2018.

Devido a questões socioeconômicas e políticas, a obtenção de certos materiais, especialmente o cobalto, está apresentando desafios para os pesquisadores. Isso tem levado ao teste de soluções inovadoras, nas quais a proporção de cobalto é reduzida ou em que o lítio é combinado com elementos mais abundantes, como silício ou oxigênio.

Além disso, há uma crescente preocupação com a gestão do fim de vida das baterias, com estudos voltados para fechar o ciclo de produção e aprimorar a reciclagem dos materiais mais valiosos. Segundo a Global Battery Alliance, estima-se que até 2030, 11 milhões de toneladas de baterias de íon-lítio atingirão o fim de sua vida útil. Diversas possibilidades de reutilização de baterias de lítio, como aquelas provenientes de veículos elétricos, estão sendo exploradas, visando sua integração em sistemas de armazenamento de energia em instalações de fontes renováveis ou sua utilização para fornecer serviços à rede elétrica. Essa abordagem busca criar um ciclo virtuoso de economia circular[68].

2.9.2 Hidrelétrica reversível (Bombeamento hidrelétrico)

Atualmente, a tecnologia de bombeamento hidrelétrico é considerada o sistema mais eficiente para o armazenamento de energia em larga escala. Essa tecnologia oferece diversas vantagens, como maior rentabilidade, estabilidade, segurança e sustentabilidade para o sistema elétrico. Ela permite a geração de uma quantidade significativa de energia com uma resposta rápida, além de não causar emissões prejudiciais à atmosfera. O bombeamento hidrelétrico é valorizado por sua eficiência e capacidade de armazenamento, desempenhando um papel crucial na estabilização e no equilíbrio do fornecimento de energia elétrica em larga escala [69].

O funcionamento deste tipo de sistema de armazenamento está resumido na figura 2.23 a seguir:

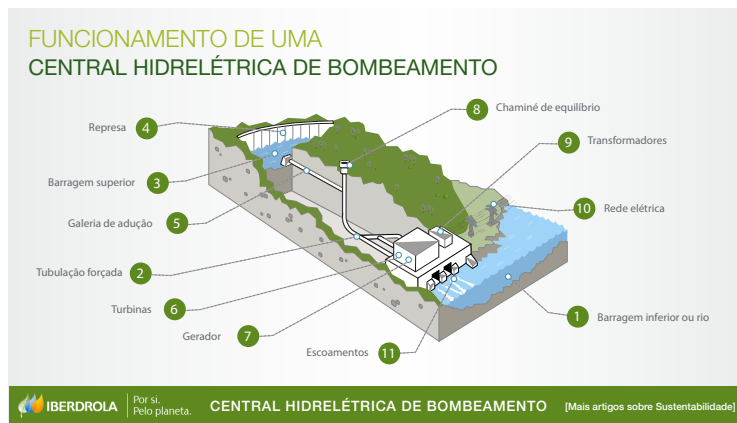


Figura 2.23: Funcionamento de uma central hidrelétrica de bombeamento (Fonte: Iberdrola - [5])

Esse tipo de usina de energia possui duas barragens em diferentes altitudes, permitindo armazenar água durante períodos de baixa demanda e utilizá-la para gerar energia durante os horários de maior consumo, atendendo assim toda a demanda elétrica.

Durante os horários de baixa demanda, geralmente à noite nos dias úteis e nos fins de semana, a energia excedente, que possui um custo mais baixo no mercado nesses momentos, é utilizada para bombear a água do reservatório inferior (1) para o reservatório superior por meio de uma bomba hidráulica que faz a água subir através de uma tubulação forçada (2) e galeria de adução. Dessa forma, o reservatório superior (3) atua como um reservatório de armazenamento.

Durante os horários de pico, durante o dia, a usina de bombeamento opera como uma usina hidrelétrica convencional: a água acumulada no reservatório superior, fechado por uma represa (4), é enviada pela galeria de adução (5) para o reservatório inferior. Nesse processo, a água passa pela tubulação forçada, adquirindo energia cinética que é convertida em energia mecânica rotativa pela turbina hidráulica (6). Essa energia é então transformada em energia elétrica de média tensão e alta intensidade pelo gerador (7). Para regular a pressão da água entre as aduções anteriores, às vezes é construída uma chaminé de equilíbrio (8).

Em seguida, a eletricidade gerada é enviada pelos transformadores (9) através das linhas de transmissão de alta tensão até chegar às residências e indústrias na rede elétrica (10) para consumo.

Após a geração de eletricidade, a água desce pelo canal de escoamento (11) em direção ao reservatório inferior, onde é armazenada novamente.

É uma opção adicional de armazenamento de energia para sistemas fotovoltaicos ou eólicos, onde parte da energia gerada pelo sistema solar é utilizada para alimentar bombas que movem a água de volta para um reservatório. Dessa forma, a água armazenada pode ser usada posteriormente para gerar energia durante períodos em que o sistema fotovoltaico não está operando, como durante a noite. Essa solução permite aproveitar a energia solar excedente e garantir um suprimento contínuo de energia, mesmo quando não há luz solar disponível.

Portanto, as usinas hidrelétricas de bombeamento são eficientes para o armazenamento de energia, oferecendo uma solução de longo prazo e facilitando a integração de energias renováveis no sistema, além de serem altamente rentáveis.

2.9.3 Sistemas de armazenamento de ar comprimido

Sistemas de armazenamento de ar comprimido são dispositivos que armazenam ar em reservatórios ou tanques pressurizados para uso posterior. Esses sistemas funcionam comprimindo o ar ambiente para aumentar sua pressão e densidade, permitindo que ele seja armazenado em volumes menores. O ar comprimido pode ser utilizado como fonte de energia em uma variedade de aplicações, como acionar motores, fornecer energia para ferramentas pneumáticas ou até mesmo para armazenar energia renovável em sistemas de energia híbrida. Quando o ar comprimido é liberado, sua energia é convertida em trabalho mecânico ou elétrico, dependendo da aplicação específica.

Esses sistemas de energia contam com um motor reversível que, nos momentos de excesso de energia, comprime o ar ambiente e o armazena em reservatórios subterrâneos em alta pressão. Esse sistema de armazenamento mecânico é comparável em capacidade ao sistema de bombeamento hidráulico [65].

2.9.4 Sistemas de armazenamento térmico

Sistemas de armazenamento térmico são dispositivos ou estruturas que armazenam energia térmica para uso posterior. Esses sistemas funcionam capturando e armazenando o calor gerado por fontes de energia térmica, como energia solar, energia geotérmica ou calor residual de processos industriais. O armazenamento térmico permite o uso flexível da energia térmica, aproveitando-a quando necessário, independentemente da disponibilidade da fonte de calor original [65].

Existem diferentes tipos de sistemas de armazenamento térmico, incluindo sistemas de armazenamento de calor sensível, que envolvem o aquecimento ou resfriamento de materiais para armazenar energia térmica; sistemas de armazenamento de calor latente, que armazenam energia térmica através de mudanças de fase, como a solidificação e fusão de materiais; e sistemas de armazenamento de calor químico, que envolvem reações químicas para armazenar e liberar energia térmica.

Os sistemas de armazenamento térmico têm várias aplicações, como fornecer aquecimento e resfriamento em edifícios, fornecer energia para processos industriais, aumentar a eficiência de sistemas de energia renovável e facilitar o gerenciamento de carga em sistemas de energia elétrica. Esses sistemas desempenham um papel importante na transição para uma matriz energética mais sustentável e na maximização do aproveitamento de fontes de energia renovável.

Os sistemas de armazenamento térmico envolvem a acumulação de energia em materiais capazes de retê-la e liberá-la de maneira controlada. Esses sistemas utilizam diferentes métodos para armazenar energia térmica, que vão desde a refrigeração com acumulação de gelo até a exposição a temperaturas muito altas. Esses métodos permitem que a energia térmica seja armazenada quando está disponível em excesso e seja liberada conforme a demanda.

2.9.5 Supercapacitores

Os supercapacitores, também conhecidos como capacitores de dupla camada ou capacitores eletroquímicos, são dispositivos de armazenamento de energia que diferem dos capacitores convencionais devido à

sua capacidade muito maior de armazenamento de carga elétrica.

Os supercapacitores são dispositivos que podem armazenar uma grande quantidade de energia elétrica em forma de cargas eletrostáticas, sem envolver reações químicas. Eles são especialmente adequados para lidar com demandas de energia intensas ou interrupções breves no fornecimento de energia, pois podem ser carregados e descarregados em questão de segundos[65].

Eles possuem uma estrutura composta por dois eletrodos separados por um eletrólito eletroquímico. Os eletrodos são revestidos com materiais altamente porosos, como o carvão ativado, que oferecem uma grande área de superfície para a adsorção de íons. Isso cria uma dupla camada elétrica na interface entre o eletrodo e o eletrólito, permitindo a armazenagem de cargas elétricas.

Uma das principais características dos supercapacitores é sua alta densidade de energia em relação aos capacitores convencionais. Eles são capazes de armazenar uma quantidade significativa de energia por unidade de massa ou volume. Além disso, possuem uma alta taxa de carga e descarga, o que significa que podem absorver e liberar energia rapidamente, permitindo uma resposta rápida a demandas de energia.

Outra característica importante dos supercapacitores é sua longa vida útil. Eles podem suportar um grande número de ciclos de carga e descarga sem degradação significativa de desempenho. Isso os torna adequados para aplicações que exigem um armazenamento de energia confiável e durável.

Os supercapacitores também são conhecidos por sua excelente capacidade de operar em uma ampla faixa de temperatura, o que os torna ideais para aplicações em ambientes extremos.

No entanto, é importante destacar que, embora os supercapacitores tenham uma alta densidade de energia em relação aos capacitores convencionais, sua capacidade de armazenamento ainda é menor do que a das baterias. Portanto, os supercapacitores são frequentemente usados em combinação com baterias para fornecer uma combinação de alta potência e alta densidade de energia[70] [71].

2.9.6 Volantes de inércia (FLYWHEEL)

Os volantes de inércia armazenam energia na forma de movimento rotacional, sendo adequados para situações que exigem descargas rápidas de alta velocidade. No entanto, esses sistemas podem ser menos competitivos em termos de custo em comparação com outras alternativas. Da mesma forma, os sistemas de armazenamento gravitacional envolvem o movimento de grandes massas para acumular energia potencial, permitindo uma descarga contínua e eficaz por longos períodos. Esses sistemas exigem o uso de controles avançados para garantir o armazenamento e liberação eficientes da energia[72].

2.9.7 Produção de hidrogênio

Uma outra opção para o armazenamento de energia visando a geração de eletricidade é por meio do hidrogênio. O hidrogênio pode ser obtido através da eletrólise da água, um processo em que a água é separada em hidrogênio e oxigênio utilizando dois eletrodos de polaridades diferentes alimentados por uma fonte de energia elétrica. O hidrogênio resultante pode ser armazenado em células combustíveis, que são capazes de gerar eletricidade e água na forma de vapor através de um processo reverso ao da eletrólise

da água. No entanto, é importante destacar que esse processo apresenta uma eficiência relativamente baixa, uma vez que demanda uma quantidade significativa de energia elétrica durante a etapa de eletrólise.

Conforme um estudo conduzido pela Agência Internacional de Energia (AIE) intitulado "The Future of Hydrogen"[73], a produção atual de hidrogênio é predominantemente baseada em combustíveis fósseis, resultando na emissão de cerca de 830 milhões de toneladas de CO₂, equivalente à combinação das emissões do Reino Unido e da Indonésia. Para reduzir significativamente a pegada de carbono do hidrogênio e impulsionar a transição energética, é necessário adotar uma produção proveniente de fontes renováveis, apoiada por uma estrutura regulatória adequada.

Com base nos dados da Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA)[74], espera-se que, até 2050, cerca de 6% do consumo final de energia no mundo possa estar ligado ao hidrogênio que, diferentemente de outros combustíveis que têm um forte impacto em nosso planeta, possui uma capacidade energética muito alta. Basta dizer que, para o mesmo peso, ele contém quase três vezes o conteúdo energético do gás natural e sua combustão não envolve a emissão de CO₂, gerando apenas vapor de água.

O hidrogênio tem uma ampla gama de aplicações em potencial. Não apenas pode ser usado como combustível limpo, mas também pode favorecer o crescimento da energia verde. Uma usina de energia solar ou eólica acoplada a um eletrolisador pode fornecer serviços de rede semelhantes aos de uma usina de energia renovável combinada com uma bateria. Com o crescente consumo das energias renováveis, será necessária uma geração flexível e instalações de energia renovável acopladas a um eletrolisador, além de produzir hidrogênio, sendo muito mais flexíveis do que uma usina autônoma.

Embora essa não seja uma alternativa para a eletrificação, que continua sendo a maneira mais fácil e barata de descarbonizar grandes porções do consumo total final de energia, o hidrogênio verde representa um complemento desse processo, uma das soluções energéticas mais promissoras, acessíveis e sustentáveis para reduzir as emissões do setor hard to abate. E para alcançar a neutralidade climática de 2050, a descarbonização de indústrias que dependem do uso de combustíveis fósseis realmente fará toda a diferença.

Além disso, se produzido dentro das fronteiras nacionais, o hidrogênio verde pode reduzir a dependência de um país das importações de combustíveis fósseis e, com a criação de uma nova cadeia de valor, pode refletir em implicações sociais positivas, com o aumento de novas oportunidades de emprego[75] [76].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da proposta de uma matriz elétrica 100% renovável e que possa garantir o aumento significativo do consumo anual per capita do Benin até a média atual até o horizonte 2050, por meio da combinação de fontes de energia solar fotovoltaica, eólica, hidrelétrica e biomassa. Antes de elaborar a proposta, foi crucial obter dados e informações relevantes para embasar as escolhas e cálculos necessários conforme explicado no Capítulo 2. A obtenção de dados sobre a disponibilidade de recursos naturais, a capacidade de geração de cada fonte de energia renovável e os requisitos técnicos e operacionais das tecnologias envolvidas foram fundamentais para a elaboração de uma matriz elétrica coerente, sustentável e viável. O capítulo abordará de forma geral os seguintes tópicos: a descrição dos dados e informações coletadas sobre o consumo atual de energia elétrica no Benin, as fontes renováveis disponíveis no país, as tecnologias e sistemas de geração de energia renovável considerados, bem como as metodologias empregadas para estimar a capacidade necessária para atender à demanda projetada.

Além disso, serão abordadas as estratégias e políticas energéticas necessárias para viabilizar a transição para uma matriz elétrica 100% renovável, levando em consideração os aspectos socioeconômicos, ambientais e regulatórios.

3.1 MÉTODO ADOTADO

Hoje em dia, no Benin, o consumo per capita em energia elétrica é de cerca de $120 \text{ kWh/ano/habitante}$ contra uma média mundial de $3265 \text{ kWh/ano/habitante}$. Ou seja, em média, um beninense tem um consumo em energia elétrica 27 vezes menos do que a média mundial. Nesta perspectiva, o presente trabalho visa a propor um mix elétrico 100% renovável para o Benin. Em outras palavras, ele visa a propor um mix elétrico 100% baseado em fontes de energia renovável como a solar, a eólica, a biomassa e a hidrelétrica de acordo com o potencial que apresenta cada uma dessas fontes no país. Para isso, o método adotado consistirá em:

1. identificar a quantidade total de energia que o país precisa gerar anualmente para induzir um aumento do consumo anual per capita em energia elétrica de $120 \text{ kWh/habitante}$ para a média anual atual que é de cerca de $3265 \text{ kWh/habitante}$.
2. avaliar o potencial que apresenta cada fonte de energia renovável a saber: a solar, a eólica, a biomassa e a hidrelétrica.
3. fazer uma distribuição da quantidade total de energia a ser gerada proporcionalmente ao potencial identificado para cada fonte.
4. dimensionar as unidades geradoras susceptíveis de gerar a quantidade de energia elétrica a ser produzida por cada fonte de acordo com a distribuição que teria sido feita no item anterior.

5. verificar a viabilidade técnica e física da implementação de cada unidade geradora para cada fonte, apontando Os desafios técnicos, financeiros e institucionais susceptíveis de dificultar tais implementações e propondo soluções para superá-los.
6. e por fim avaliar o custo aproximado da implementação deste mix até o horizonte 2050.

O seguimento deste método faz intervir outros fatores que aparecerão no diagrama ilustrativo a seguir:

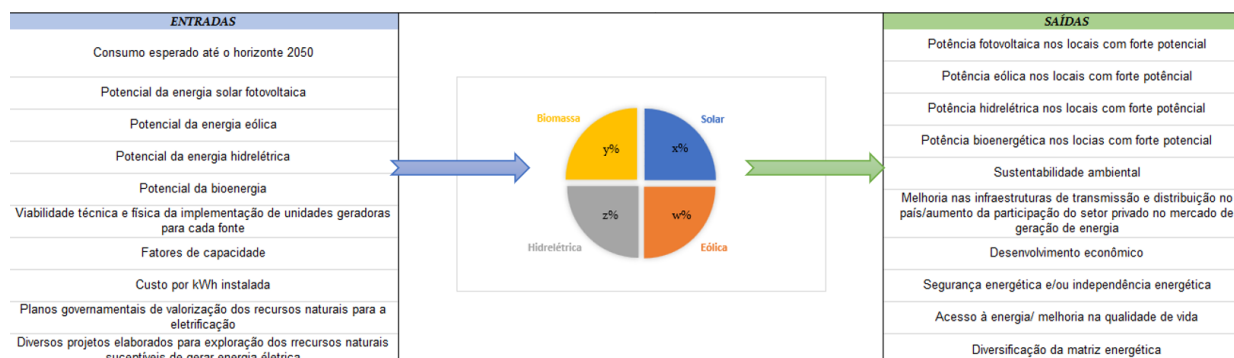


Figura 3.1: Diagrama ilustrativa do método adotado. (Fonte: O autor.)

3.2 A SITUAÇÃO ATUAL DA MATRIZ ELÉTRICA DO BENIN

Segundo um relatório de estudo de viabilidade sobre o sistema de distribuição do Benin realizado pelo MCC-Benin¹[77], o setor energético do Benin é principalmente caracterizado pela biomassa, que inclui lenha, carvão vegetal e resíduos vegetais, como parte do mix energético geral. O acesso à eletricidade é relativamente baixo. A situação geral do fornecimento de eletricidade no Benin pode ser caracterizada por serviços de baixa qualidade oferecidos aos consumidores, resultando em longos tempos de conexão, erros de faturamento, cortes de energia, flutuações de tensão, altos custos, baixa cobertura geográfica, uma taxa nacional de eletrificação de cerca de 30%, uma taxa de eletrificação rural baixa de 5,5% (2013) e uma alta taxa de perdas. Essas condições causam danos significativos aos consumidores e à economia nacional.

O setor energético é caracterizado por apenas algumas fontes de eletricidade limpa, com uma grande dependência das importações de eletricidade dos países vizinhos, como Nigéria, Gana e Costa do Marfim. Cerca de 99,6% da eletricidade foi importada em 2013 pela CEB². A baixa contribuição da produção nacional para o fornecimento de eletricidade caiu de 11% em 2010 para 0,4% em 2013. O país depende muito das importações, o que torna a economia nacional vulnerável a variações nos volumes e custos de abastecimento. O consumo nacional de eletricidade aumentou de 624 GWh em 2005 para 1099 GWh em 2013.

Embora que o país esteja fortemente dependente das importações, o conjunto de tais importações e da produção local de energia elétrica não consegue suprir a demanda cada vez maior em eletricidade da população.

¹Millenium Challenge Corporation - Benin

²Communauté Electrique du Benin ou Comunidade Elétrica do Benin em português

Apesar do crescimento relativo na produção nacional de energia elétrica, especialmente após 2006, a taxa de auto-suficiência continua baixa, com um valor de 15% em 2005. Essa taxa foi avaliada em 22% em 2006 devido à crise energética, que resultou em uma produção térmica significativa em nível nacional. O gráfico da figura 3.2 abaixo ilustra o nível de oferta em relação à demanda.

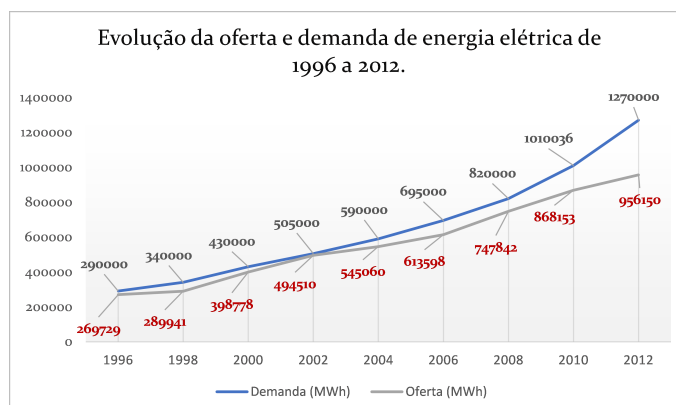


Figura 3.2: Evolução da oferta e demanda de energia elétrica de 1996 a 2012. (Fonte: Adaptado de [6], página 112).

Além disso, alguns aspectos da política tarifária podem necessitar de alguns ajustes e aprimoramentos, as tarifas de eletricidade podem não refletir integralmente o custo real da energia fornecida. Adicionalmente, as faturas dos consumidores permanecem não pagas por longos períodos. O efeito combinado é um desequilíbrio no setor elétrico em geral e nas empresas em particular, resultando na causa principal dos problemas no setor energético. A escassez de liquidez afeta a capacidade da SBEE³ de realizar a manutenção adequada para manter os equipamentos e instalações elétricas em boas condições ou de estabelecer uma classificação de crédito suficientemente boa para mobilizar fundos para o desenvolvimento posterior da empresa.

A produção de eletricidade é assegurada pelas *centrais elétricas públicas*⁴ conectadas à rede e por *auto produtores*⁵ independentes que possuem seus próprios meios de produção. A produção de eletricidade das centrais públicas e dos auto produtores atingiu 27 mil toneladas equivalentes de petróleo (323 GWh) em 2015, em comparação com 9 mil toneladas equivalentes de petróleo (114 GWh) em 2010 como ilustra a figura 3.3 abaixo. Esse aumento na produção de eletricidade é devido ao aumento na produção das centrais públicas e dos auto produtores para suprir o déficit de energia elétrica proveniente da Comunidade Elétrica do Benin (CEB).

³Société Béninoise d'Énergie Electrique ou Companhia Beninense de Energia Elétrica em português

⁴As centrais elétricas públicas englobam todas as unidades de geração térmica públicas localizadas no território. Elas pertencem tanto à Comunidade Elétrica do Benin quanto à Sociedade Beninense de Energia Elétrica. As centrais públicas geraram 211 GWh de eletricidade em 2015, utilizando 21 mil toneladas equivalentes de diesel, 4,68 mil toneladas equivalentes de JET A1 e 31,1 mil toneladas equivalentes de gás natural. Observa-se um aumento significativo em relação a 2010, quando a produção era de apenas 87 GWh. Em 2015, a eficiência das centrais térmicas da SBEE foi de cerca de 32%, representando um ganho de 6,5% em relação a 2010, quando era de apenas 25,5%.

⁵A produção de eletricidade pelos auto produtores é realizada a partir de fontes de energia mais diversificadas, incluindo produtos petrolíferos (óleo combustível e diesel) e biomassa energética (resíduos agrícolas). Em 2015, a autoprodução de eletricidade atingiu 112 GWh.

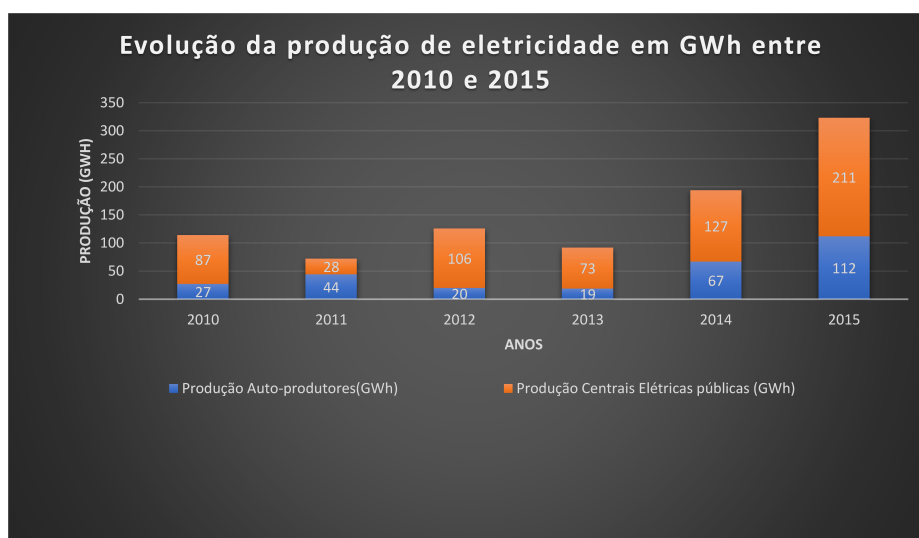


Figura 3.3: Evolução da produção de eletricidade em GWh entre 2010 e 2015. (Fonte: Site Autorité de Regulation de l'Électricité ARE).

No geral, há um baixo nível de investimento no setor privado de negócios devido a condições regulatórias pouco atrativas.

3.2.1 Alguns dados importantes

3.2.1.1 Previsão da Demanda

O principal impulsionador da demanda por consumo de eletricidade é o crescimento demográfico previsto. Levando em consideração as tendências observadas após a elaboração do novo plano diretor para o setor de energia, a demanda por eletricidade é prevista tanto para a demanda de baixa tensão urbana quanto para a demanda de média tensão, que é principalmente impulsionada pela indústria. Para fins deste estudo, foram utilizados os números indicados na tabela 3.1 abaixo.

Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2025
Capacidade (MW)	242	280	307	338	383	410	577
Energia (GWh)	1401	1618	1777	1952	2216	2371	3338

Tabela 3.1: Previsão da demanda de eletricidade.(Adaptado de [11])

O conjunto atual de usinas instaladas no Benin faz parte das instalações de propriedade e operadas pela SBEE, com eletricidade produzida fornecida pela CEB, em conjunto com as compras de empresas privadas como Aggreko e Maurice Réalisations Internationales (MRI). A SBEE possui e opera várias usinas térmicas e também opera usinas térmicas de propriedade ou arrendadas pelo Governo do Benin (GdB). A reabilitação das usinas térmicas estava incluída no plano estratégico da SBEE para o período de 2014 a 2019. A hidroeletricidade e as instalações a diesel de propriedade da SBEE estão praticamente fora de operação devido a falhas e à incapacidade de obter o financiamento necessário (por exemplo, Yeripao). A eletricidade gerada no Benin pela CEB ainda não cobre todo o país, resultando em déficits frequentes

de eletricidade. A SBEE está atualmente expandindo o fornecimento de eletricidade no país devido ao aumento constante da demanda. Como mostra a tabela 3.2, a capacidade de produção existente no Benin ainda é limitada, embora não esteja fora de serviço. A eletricidade fornecida pela CEB é proveniente de importações da Nigéria e do Gana, além da produção da usina hidrelétrica de Nangbéto.

Nome / Local do site	Tipo de Combustível	Potência Instalada	Operador	Ano de Entrada em Serviço	Observações
Aggreko	Diesel Combustível Leve	55 MW	SBEE/GdB	2014	alugado
MRI	Diesel Combustível Leve	31 MW	SBEE/GdB	2014	alugado
Central Hidrelétrica de Nangbeto (Produção igualmente compartilhada)	Hidrolétrica	63 MW	CEB	-	Deve ser mantida
Central de Porto-Novo	Diesel Óleo Leve	12 MW	SBEE	2005	Manutenção necessária
Central de Parakou	Diesel Combustível Leve	15 MW	SBEE	2005	Fora de serviço
Central de Natitingou	Diesel Combustível Leve	12 MW	SBEE	2005	Fora de serviço
Central de Akpakpa	Diesel Óleo Pesado	22 MW	SBEE	1982/1998	Fora de serviço - Revisão
Centrale CAI de Maria Gleta	Jet A-1	80 MW	SBEE	2010	Sem fornecimento de GN, portanto, deve ser operado com Jet A-1
Centrale Hidrelétrica de Yeripao	Hidrolétrica	0.6 MW	SBEE	1997	Fora de serviço

Tabela 3.2: Apresentação da Potência Instalada.(Adaptado de [11])

Os dados da Tabela 3.3 ilustram a tendência de queda na produção local de eletricidade em relação às importações nos anos anteriores.

Anos	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Produção hidrelétrica em Yeripao (GWh)	0.8	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
Produção térmica da SBEE (GWh)	81	126	180	199	112	87	13	8	5
Auto-produção (GWh)	25	24	38	27	15	27	44	20	19
Produção total nacional (GWh)	107	151	218	225	127	114	12.8	8.7	4.5
Importações da CEB (GWh)	542	533	525	612	809	878	1005	1065	1095
Fornecimento total (produção nacional + importações) (GWh)	649	684	743	837	936	992	1018	1074	1099
Auto-suficiência (%)	16.5	22.0	29.4	26.9	13.6	11.4	1.3	0.8	0.4

Tabela 3.3: Produção e importação de eletricidade. (Adaptado de [11])

A estratégia nacional está focada em melhorar a independência energética do Benin, aumentar a diversificação das fontes de energia, implementar projetos de interconexão com países vizinhos e explorar o potencial disponível em nível nacional de energia renovável. Este trabalho está inserido nesse mesmo contexto, razão pela qual nas subseções a seguir serão apresentados os atlas dos diversos potenciais disponíveis em termos de energias renováveis, com o objetivo de propor uma combinação de geração limpa de energia elétrica que atenda às necessidades do Benin se baseando no potencial que possui o país em termo energia renováveis. Isso permitirá que o país não apenas conheça sua dependência energética até 2050, mas também aumente o consumo anual per capita de energia elétrica para alcançar a média mundial atual, garantindo um acesso de qualidade à energia.

3.2.1.2 Racionamento do fornecimento de energia elétrica: Causas e Consequências

O racionamento, em uma rede elétrica, é uma interrupção voluntária no fornecimento de energia para um ou mais consumidores não preferenciais, a fim de restabelecer rapidamente o equilíbrio entre a produção e o consumo na rede. No entanto, esses cortes de energia, na mente coletiva do Benin, muitas vezes estão associados à indisponibilidade generalizada de energia elétrica por vários dias ou a interrupções repetidas de várias horas.

Em diferentes períodos, essa indisponibilidade de energia elétrica pode ser causada pela queda drástica nos níveis de água nas barragens hidrelétricas de Nangbeto, por dificuldades técnicas nas usinas termelétricas da Nigéria, principal fornecedor de energia elétrica para o Benin, por grandes perdas de potência durante o transporte de energia elétrica e por falhas técnicas ou não na rede da SBEE (Société Béninoise d'Énergie Électrique).

As interrupções de energia elétrica podem ocorrer a qualquer hora do dia ou da noite e geralmente não são anunciadas pelos serviços administrativos competentes. Sua duração varia, podendo ser de alguns minutos a vários dias antes que a energia seja restabelecida.

De acordo com o relatório do questionário domiciliar sobre o consumo de energia elétrica realizado pelo INSAE⁶ no Benin conforme citado em [10], em caso de falta de energia elétrica, os domicílios utilizam principalmente como fontes alternativas a lanterna com pilhas, com uma taxa de 15,2%, o petróleo doméstico para lampiões a óleo, com 9,5%, velas, com 9,4%, e geradores elétricos, com 2,4%. Nas áreas rurais, o petróleo doméstico é utilizado em 12,5% dos casos, e a lanterna com pilhas em 15,1%, enquanto nas áreas urbanas, a lanterna com pilhas é utilizada em 15,3% dos domicílios.

De acordo com o resumo executivo do Plano Diretor de Desenvolvimento do sub-setor de energia elétrica con forme citado em [10], a estimativa de perdas devido a cortes de energia e outras interrupções é baseada na avaliação das estatísticas de interrupções no fornecimento de energia elétrica, que têm uma média de tempo de interrupção de 6% ao ano, ou seja, cerca de 22 dias por ano. A "Millennium Challenge Corporation" menciona, por outro lado, 8 interrupções com duração média de 2 horas por mês ([78]). As perdas não técnicas são estimadas em 9,3% das vendas faturadas pela SBEE, e as perdas devido a cortes de energia são de 5%. Em 2013, as perdas técnicas e não técnicas foram estimadas em 21,31% da energia injetada na rede nos pontos de origem; em 2012, foram de 21,70%, e em 2011, foram de 21,76% [79]. O gráfico da figura 3.4 a seguir, mostra a porcentagem de perdas na rede elétrica:

⁶Institut National de la Statistique e de l'Analyse Économique

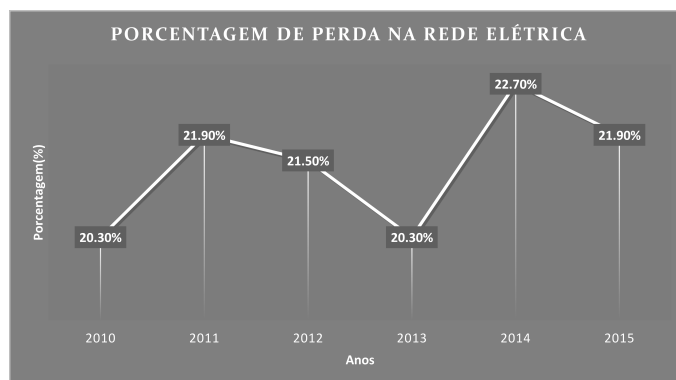


Figura 3.4: Percentual de perdas na rede elétrica de 2010 a 2015. (Fonte: Adaptado de [6]).

O total de perdas representadas no gráfico leva em consideração as perdas relacionadas ao transporte de energia elétrica, as perdas totais relacionadas à distribuição de energia elétrica, as perdas técnicas relacionadas ao racionamento e as perdas não técnicas relacionadas ao roubo de fios de cobre ou conexões informais.

Essa figura ilustra bem o fato de que, apesar das várias reformas e trabalhos na rede da empresa nacional de energia elétrica, as perdas permaneceram quase estáveis durante os cinco anos do estudo, em torno de uma média de 21,43%. Outro estudo realizado pela SBEE de 2014 a 2018 avaliou as perdas em cerca de 23%. A tabela 3.4 abaixo dá uma visão geral a respeito:

Anos	2014	2015	2016	2017	2018
Vendas (GWh)	867,354	923,576	923,557	99,012	1023,940
Energia enviada na rede (GWh)	1138,865	1202,290	1213,057	1289,755	1319,445
Rendimento (%)	76,16	76,82	76,13	76,91	77,60
Perda (%)	23,84	23,18	23,87	23,09	22,40
Evolução Rendimento (%)	-3,27	0,86	-0,89	1,02	0,90
Evolução Perdas (%)	12,09	-2,76	2,95	-3,27	-2,99

Tabela 3.4: Perdas e rendimento na distribuição de energia elétrica no Benin. (Fonte: SBEE, 2018 - Adaptado de [6])

As interrupções de energia elétrica têm muitas consequências prejudiciais para as populações, bloqueando a atividade dos prestadores de serviços que dependem de sua disponibilidade, deixando todas as famílias no escuro (aumentando a insegurança), impedindo os alunos de fazerem suas tarefas (resultando em notas ruins e fracasso escolar) e os pais de realizarem suas tarefas diárias.

Assim, as pessoas utilizam alternativas para lidar com a falta de energia elétrica até que ela seja restabelecida. Para os prestadores de serviços ou famílias mais abastadas, há disponibilidade de geradores elétricos para assumir o fornecimento. No entanto, para o restante da população, trata-se de um período de inatividade que dura até que a energia elétrica seja restabelecida. Enquanto isso, o uso de velas, lanternas ou lâmpadas a óleo é adotado de acordo com as necessidades.

No entanto, os danos mais significativos causados por essas interrupções repentinas de energia elétrica são, sem dúvida, a destruição das ferramentas de trabalho dos prestadores de serviços ou a possibilidade de choques elétricos para algumas pessoas. Isso se deve à sobretensão na rede quando a energia elétrica é restabelecida, já que a maioria dos aparelhos não foi desligada a tempo e não possui reguladores de tensão, ou porque os trabalhadores estão manipulando equipamentos elétricos sensíveis nesse momento.

Infelizmente, essas situações não resultam em qualquer compensação, uma vez que os clientes da empresa estatal não podem fornecer provas materiais da responsabilidade do operador da rede no ocorrido.

No entanto, as consequências socioeconômicas desses incidentes são bastante perceptíveis. De acordo com o Instituto Nacional de Estatística e Análise Econômica, a crise de energia elétrica de 1998 custou mais de 10 bilhões de francos CFA para a economia nacional, resultando em cerca de cem mortes nos hospitais e vários casos de acidentes elétricos com inúmeros custos sociais e humanos.

Como citado por Yehouenou em [10], de acordo com [9], "diferentes estudos realizados pelo Millenium Challenge Corporation em 2014 e pelo INSAE em 2015) mostraram que o déficit e a interrupção no fornecimento de energia resultam em perdas de 3 a 5% do PIB. Em geral, Andersen e Dalgaard em [80], calcularam o impacto de longo prazo dos racionamentos na crescimento econômico na África subsaariana de 1995 a 2007. Seus resultados mostram que, em média, para um aumento de 1% nos racionamentos, ocorre uma redução de 2,86% do PIB per capita a longo prazo"

3.2.1.3 Taxa de eletrificação

De outro lado, essas várias tragédias relacionadas aos constantes racionamentos também são devidas à baixa cobertura da rede elétrica no território. A taxa de eletrificação nacional⁷ é ainda mais baixa do que a taxa de acesso à energia elétrica. De acordo com o Sistema de Informação Energética do Benin (SIE, 2015), ela aumentou de 25,32% em 2010 para 37,71% em 2021, representando a conexão de 638732 novos domicílios à rede de distribuição da SBEE, uma média anual de 58066 assinantes no período.

É importante ressaltar que a taxa de eletrificação dos domicílios no Benin poderia ser mais alta, uma vez que a taxa de eletrificação não leva em consideração a sublocação, ou seja, os domicílios que têm acesso à energia elétrica, mas não são assinantes da SBEE.

⁷A taxa de eletrificação nacional é calculado dividindo a população efetivamente conectada formalmente pela população total do país. Isso significa que é feita a relação entre o número de assinantes de baixa tensão (assinantes domésticos) registrados pela empresa de energia elétrica do Benin e o número total de domicílios conhecidos registrados pelo Instituto Nacional de Estatística e Análise Econômica do Benin.

Durante o período de 2010 a 2021, a taxa de eletrificação nacional teve um aumento relativamente baixo. A evolução da taxa de eletrificação em nível nacional é ilustrada pelo gráfico 3.5 abaixo.

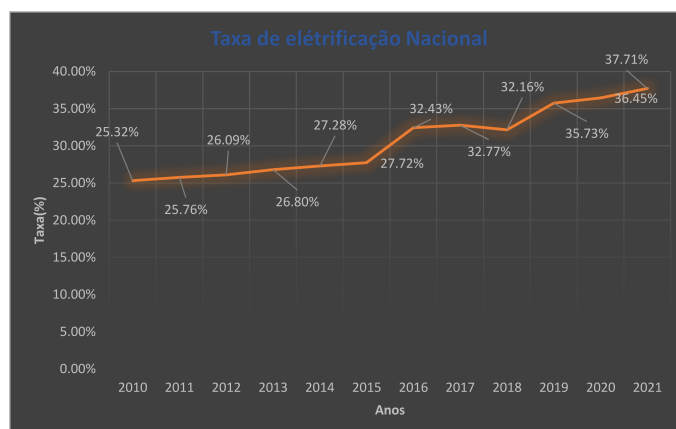


Figura 3.5: Evolução da taxa de eletrificação nacional entre 2010 e 2021 no Benin. (Fonte: SIE Benin Adaptação atualizada de [6]).

Já na área urbana, segundo o site⁸ do SIE-Benin a taxa de eletrificação aumentou de 47,82% em 2010 para 67,2% em 2021, o que representa a conexão de cerca de 297000 novos domicílios à rede de distribuição da SBEE. Isso resultou em uma média anual de 26925 novos assinantes durante o período analisado. O gráfico da figura 3.6 a seguir oferece uma visão geral da evolução da eletrificação nas áreas urbanas.

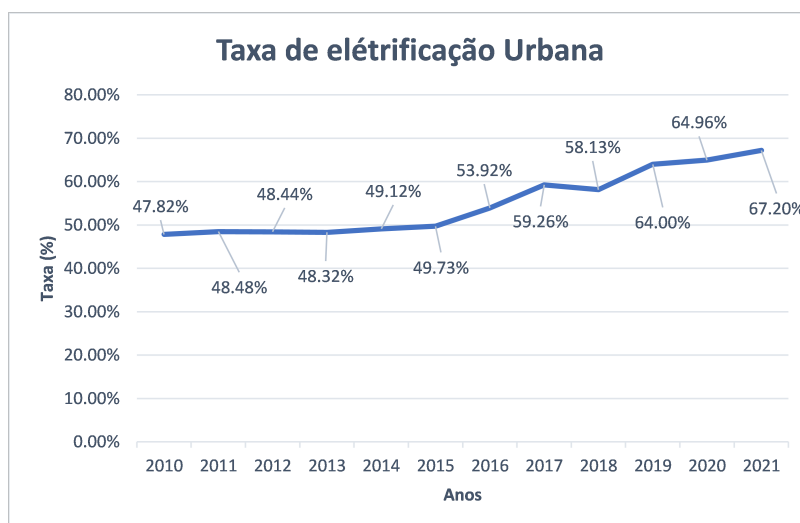


Figura 3.6: Evolução da taxa de eletrificação urbana entre 2010 e 2021 no Benin. (Fonte: SIE Benin Adaptação atualizada de [6]).

Na mesma linha, a taxa de eletrificação em áreas rurais aumentou de 3,39% em 2010 para 10,72% em 2021, representando a conexão de 99037 novos domicílios, uma média anual de 9003 assinantes durante esse período. No entanto, essa taxa em áreas rurais é muito baixa em comparação com a taxa em áreas urbanas. O gráfico da figura 3.7 ilustra a evolução da taxa de eletrificação rural.

⁸sie.uemoa.int

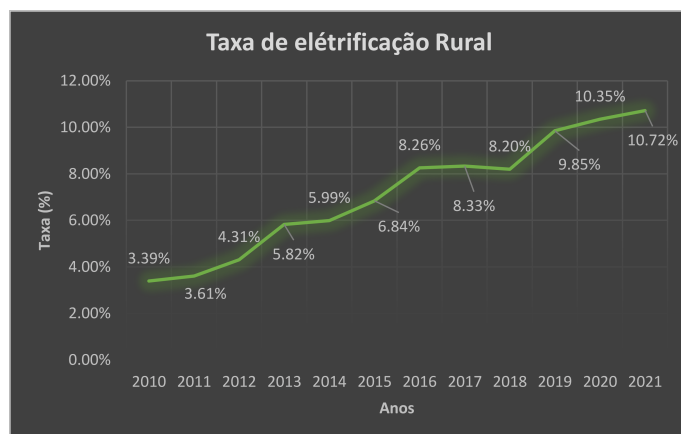


Figura 3.7: Evolução da taxa de eletrificação rural entre 2010 e 2021 no Benin. (Fonte: SIE Benin Adaptação atualizada de [6]).

As diferenças são muito importantes entre as taxas de eletrificação dentro das cidades e aquelas nas regiões distantes delas. Essa disparidade também é observada entre os departamentos do país, apresentando variações que vão de 7,5% (Departamento de Alibori) a 94,2% (Departamento do Littoral). O gráfico na figura 3.8 dá uma visão geral sobre isso.

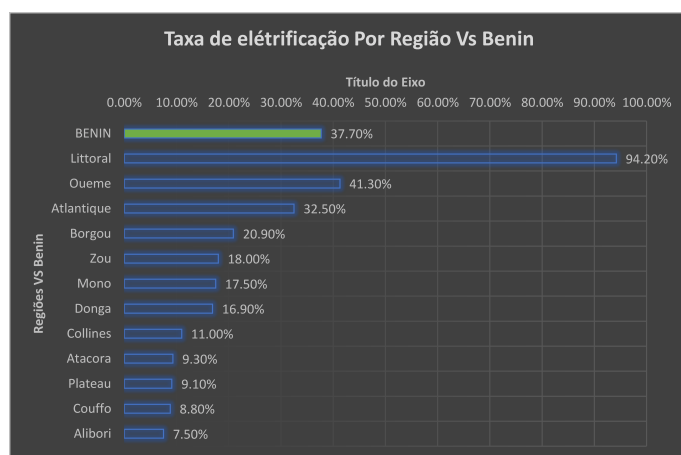


Figura 3.8: Taxa de eletrificação Por Região Vs Benin. (Fonte: SIE Benin (2015) Adaptação atualizada de [6]).

Dos doze departamentos, apenas o departamento do Littoral ultrapassa a marca de 50% de eletrificação; quatro departamentos têm uma taxa de eletrificação inferior a 10%, a saber, Atacora, Plateau, Couffo e Alibori (consulte o mapa da figura 2.1 do Benin). No que diz respeito especificamente à **taxa de cobertura**⁹, constata-se que essa taxa de cobertura é maior do que a taxa de eletrificação, pois apenas uma parte das residências nas localidades eletrificadas está conectada à rede da SBEE. Assim, em áreas urbanas, especialmente em cidades com status especial, como Cotonou, Porto Novo e Parakou, a taxa de cobertura da rede é praticamente 100%, pois todas as localidades urbanas estão eletrificadas.

A tabela 3.5 a seguir mostra a evolução da taxa de cobertura de energia elétrica em nível nacional,

⁹ é a relação entre o número de localidades eletrificadas e o número total de localidades do país

urbano e rural durante o período de 2010 a 2015.

Taxa de cobertura	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Nível nacional	34.9%	37.2%	39.2%	41.9%	44.8%	47.3%
Área urbana	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Área rural	12.72%	15.76%	18.5%	22.00%	25.9%	29.3%

Tabela 3.5: Taxa de cobertura de energia elétrica em nível nacional, urbano e rural durante o período de 2010 a 2015. (Adaptado de [11])

No que diz respeito à taxa de atendimento, é importante lembrar que ela indica a proporção da população que vive em uma localidade eletrificada em relação à população total do território estudado. Os 12 departamentos¹⁰ são divididos em 3 categorias na tabela 3.6:

Categoria	Taxa de atendimento(%)	Departamentos
1	>65%	LITTORAL, OUEME, ATLANTIQUE
2	[45;65]%	ALIBORI, BORGOU, COLLINES, COUFFO, DONGA, MONO, PLATEAU
3	<43%	ATACORA

Tabela 3.6: Taxa de atendimento. (Adaptado de [11])

Observa-se que são principalmente os departamentos do sul que têm um melhor atendimento em energia elétrica, ao contrário dos do norte, onde a proporção da população de Atacora vivendo em áreas eletrificadas é inferior a 45%. Embora fraco, a rede elétrica do Benin cobre todo o território nacional, do norte ao sul. A rede de distribuição da SBEE é composta por subestações de alta tensão/média tensão e média tensão/média tensão, que distribuem energia elétrica para todos os consumidores através de 13 subestações 30/6,6kV, 7.627 km de linhas de média tensão (6,6 e 30 kV), 6.761 km de linhas de baixa tensão e 3.511 postos de média/baixa tensão.

Até o momento, identificamos e evidenciamos vários problemas relacionados ao fornecimento de energia elétrica no Benin, ao acesso à eletricidade pela população e à discrepância significativa entre a oferta e a demanda de energia no país. Essas dificuldades estão prejudicando a economia interna e resultando em uma baixa qualidade de vida da população, em comparação com outros países da região ocidental da África.

No entanto, existem importantes desafios que dificultam o acesso à eletricidade e estão relacionados à obsolescência da rede elétrica e à baixa taxa de cobertura elétrica (embora essa taxa esteja aumentando). Essa situação resulta em cortes de energia na rede, que também é vítima de roubo de energia ou conexões ilegais. O problema geral que surge é que a oferta de energia não consegue atender à demanda constantemente crescente. Essa situação é o resultado das escolhas energéticas dos diferentes governos e da má governança e gerenciamento de vários projetos.

Atualmente, a oferta de energia elétrica de todos os fornecedores externos (Costa do Marfim, Gana e Nigéria) da comunidade elétrica do Benin e a produção interna do país ainda não conseguem suprir a

¹⁰Note que "departamentos" é um termo utilizado no Benin para se referir a divisões administrativas, equivalentes a estados ou províncias em outros países.

demanda dos dois países da comunidade, ou seja, Benin e Togo. O déficit atual registrado no pico de demanda é de cerca de 40 a 50 MW para o Benin.

É preocupante que o déficit de energia elétrica aumente consideravelmente nos próximos anos, devido ao rápido crescimento da demanda de energia elétrica nas áreas urbanas, que têm uma taxa de crescimento demográfico de 4,6% ao ano, em comparação com 1,7% ao ano nas áreas rurais, segundo o INSAE. Portanto, é de extrema urgência pensar em como tornar o Benin autossuficiente em energia elétrica, a fim de atender plenamente às necessidades energéticas de sua população e aumentar o consumo anual de energia elétrica por habitante no país para o nível médio mundial atual.

Para o efeito deste trabalho, as diferentes fontes de energias renováveis consideradas são:

- Energia gerada a partir da biomassa (Bioenergia)
- Energia solar fotovoltaica
- Energia Hidrelétrica
- Energia Eólica

3.3 O POTENCIAL DE CADA UMA DAS FONTES

A fim de propor um mix de fontes de energia renovável que seja mais adequado à realidade do país em termos de potencial de cada fonte, e que seja capaz de gerar a quantidade necessária de energia elétrica para o Benin, visando sua autossuficiência energética até 2050, além de proporcionar um aumento significativo no consumo anual per capita de energia elétrica, é crucial obter uma compreensão do potencial disponível de cada fonte considerada em nosso estudo. Portanto, a seguir serão apresentadas seções que abordarão essa questão de maneira mais refinada.

3.3.1 Potencial Biomassa

O Benin é um país agrícola com meios de produção rudimentares. Apesar do estado de desenvolvimento agrícola, este setor continua sendo a principal fonte da maioria dos produtos exportados pelo Benin. Isso confirma que o país tem um potencial agrícola considerável e potencial de resíduos domésticos para uso como energia [81] (PNUD, 2010). Estudos de viabilidade do uso de biomassa para geração de energia mostraram que esses resíduos agrícolas podem aumentar a produção doméstica de energia e, portanto, reduzir o consumo de combustíveis fósseis ao gerar energia elétrica [82] (DPE, 2015). As atividades geradoras de biomassa são as atividades agrícolas, pecuárias, florestais e de consumo doméstico. Um estudo do PNUD (2010), baseado nas taxas de crescimento da produção agrícola de 2007 e 2008 no Benin, mostrou que a produção de eletricidade a partir de resíduos agrícolas pode gerar mais de 2.700 GWh, usando apenas 20% desses resíduos. Além disso, o departamento de Atlantique, localizado no sul do país, poderia gerar mais de 285 GWh/ano com o uso de resíduos de óleo de palma, milho, arroz, castanha de caju, amendoim e painço. A produção de abacaxi e sorgo também poderia ser usada para produzir mais energia

[10] (YÊHOUEYOU, 2020). O Benin é um exportador de algodão na CEDEAO¹¹ (ECOWAS em inglês), os resíduos da produção de algodão podem ser usados para produzir gás e eletricidade, ajudando o Benin a se tornar autossuficiente em energia. Da mesma forma, os resíduos domésticos podem ser convertidos em energia e são uma matéria-prima ideal para a produção de biogás. De acordo com o PNUD (2010), usando dados de coleta de resíduos domésticos (50%) na cidade de Cotonou, 180.000 kg/dia de resíduos poderiam ser recuperados, que poderiam ser usados para produzir biogás e ou instalar uma usina de capacidade mínima de 5 MW na cidade.

3.3.1.1 Gestão dos lixos urbanos no Benin

O setor primário gera uma quantidade significativa de resíduos agrícolas, principalmente da cultura do algodão, mas também do milho, castanha de caju, palmeira de óleo, coqueiros e várias outras produções agrícolas. Esses resíduos, quando não utilizados como adubo para os solos, podem ser aproveitados como alimentação animal ou como combustível para a geração de energia.

De acordo com o Banco Mundial, o crescimento do Benin acelerou em 2017, passando de 4% para 5,6% (com um crescimento do PIB per capita de 2,7%), impulsionado pelo aumento na produção do setor agrícola, especialmente a produção recorde de algodão estimada em 450.000 toneladas. Esses aumentos na produção resultam em mais resíduos agrícolas, que atualmente são queimados ou deixados como adubo nos campos para melhorar a fertilidade do solo[10].

Segundo o PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento) em 2010, levando em consideração uma taxa de coleta de resíduos de 50% e um teor de material biodegradável de 60%, obtém-se uma quantidade de resíduos aproveitáveis de 180.000 kg por dia.

Esses resíduos domésticos podem ser aproveitados em biodigestores para a produção de biogás ou queimados para gerar calor e acionar turbinas elétricas. Esse potencial existente poderia permitir a instalação de uma usina elétrica com capacidade mínima de 5 MW na cidade de Cotonou.

A composição e quantidade de resíduos variam de um centro urbano para outro. De acordo com a estratégia nacional de gestão de resíduos elaborada e aprovada em 2007, a quantidade de resíduos produzidos pelo conjunto dos centros urbanos do Benin e por categoria de cidades é apresentada conforme mostrado na Tabela 3.7. No total, os centros urbanos do Benin produzem 1317 toneladas de resíduos por dia, o que equivale a 480.589 toneladas por ano. As cidades com mais de 100.000 habitantes produzem 220.638 toneladas, representando 45,90%, as cidades com 50.000 a 100.000 habitantes produzem 48.120 toneladas, correspondendo a 9,87%, e as pequenas cidades produzem 202.849 toneladas, representando 42,6% do total.

Categoria de cidades	População	Qtde produzida/habitante/dia (em kg)	Qtde produzida/dia (em T)	Qtde produzida/ano (em T)
Cidades com + 100.000 hbtes	1 200 968	0,5	604	220 638
Cidades de 50.000 a 100.000 hbtes	1 464 411	0,46	556	204 895
Cidades de 10.000 a 50.000 hbtes	282 415	0,38	130	47 417
Conjunto de centros urbanos	2 947 794	0,45	1317	480 589

Tabela 3.7: Quantidade de resíduos produzidos nos centros urbanos do Benin(PAGIDF 2011)

¹¹Communauté Économique Des États de l’Afrique de l’Ouest

Diversos estudos de viabilidade sobre a valorização da biomassa demonstraram que aproveitar esses resíduos permitiria aumentar a capacidade de produção interna e, conseqüentemente, reduzir as importações de energia fóssil e energia elétrica. Além disso, os resíduos domésticos aproveitáveis como fonte de energia são uma matéria-prima ideal para a produção de biogás[10].

Combinando várias fontes de resíduos agrícolas, os departamentos de Borgou e Alibori poderiam produzir o equivalente a 2000 GWh/ano com mais de 300 MW de capacidade instalada. Um estudo de Mensah et al., (2021)[83], sobre a geração de energia a partir do biogás no Benin, abrangeu dez municípios e mostrou ganhos energéticos de 24,1 GWh/ano para o país, com benefícios anuais estimados em 3 milhões de dólares. Essa energia equivale a 2,21% de toda a energia importada (1.088 GWh), em 2016 [84] (CIA, 2016), e 1,82% em 2018 [85] (ARE, 2018), respectivamente, e o biogás produzido em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) anaeróbias pode melhorar a situação sanitária do país. Segundo uma pesquisa da Agência Internacional de Energia Renovável [86] (IRENA, 2018), o potencial teórico estimado de biomassa no Benin é de 761 MW em 2014 para coprodução. Apesar do potencial significativo e do entusiasmo em usar o biogás no Benin para produzir eletricidade, o processo é lento para se desenvolver e enfrenta algumas dificuldades, como problemas de popularização, gerenciamento de material orgânico (coleta e armazenamento), controles técnicos e manutenção de equipamentos (inflamáveis e produção de gás corrosivo) e o alto custo a nível doméstico [82] (DPE, 2015). Vale ressaltar que a pecuária poderia contribuir com a produção de biogás a partir de resíduos. De acordo com a zona agroecológica para pecuária no Benin, o potencial de biogás e eletricidade foi determinado.

3.3.2 Potencial hidrelétrico

De acordo com (Sikirou e Boko, 2004, "*Le Benin*", p. 23), conforme citado por Yehouenou em sua tese de doutorado [10], "O Benin é irrigado por muitos cursos d'água pertencentes a duas grandes bacias: a bacia do Níger e a bacia costeira. A maioria desses cursos d'água tem sua origem em Atacora[...]. A bacia do Níger inclui o Mékrou, o Alibori e a Sota. A bacia costeira é mais irrigada. Ela é percorrida pelo Ouémé, pelo Couffo e pelo Mono".

No entanto, novas delimitações dividem a parte norte do país em duas bacias, a bacia do Níger e a bacia do Volta, e ao sul, o grande conjunto costeiro composto pela bacia do Mono e Couffo e pela bacia do Ouémé e Yéwa.

Sub-bacias com um potencial teórico atraente de energia hidrelétrica são encontradas no sudeste e noroeste do Benin como mostrado na figura 3.9 a seguir:

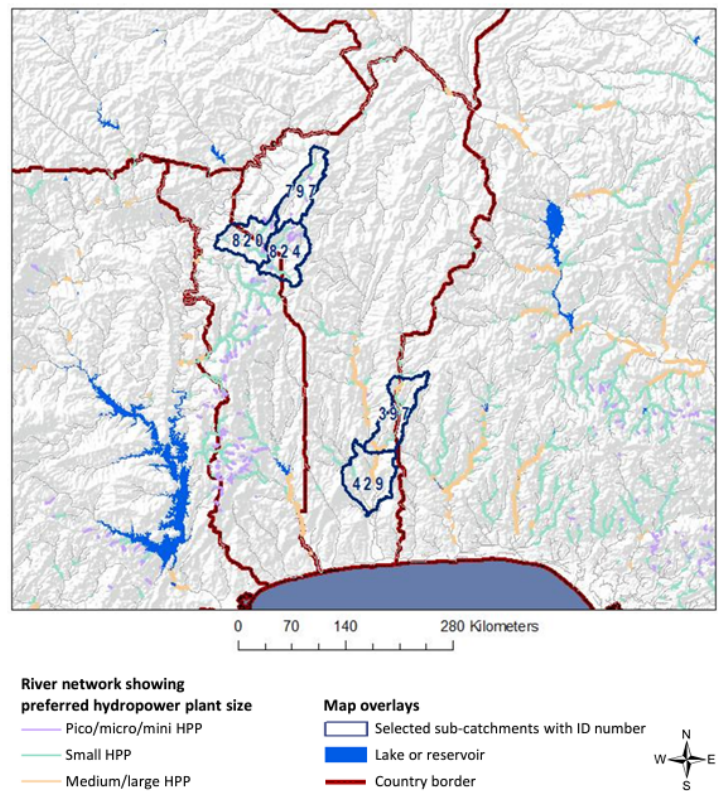


Figura 3.9: Mapa das sub-bacias com potencial atraente no Benin. (Fonte: GIS Ressources Mapping Adaptação atualizada de [7]).

O rio Ouémé é o maior rio do Benin. Cerca de 43% do país está localizado na bacia do Ouémé, que deságua no sul, no Golfo da Guiné. Os rios na parte norte do país deságuam para o norte e leste, sendo afluentes do rio Níger. No geral, 39% do país está localizado na bacia do Níger. Outras regiões do país pertencem às bacias do Volta e do Couffo (veja o mapa e a tabela abaixo na figura 3.10). As figuras na página seguinte ilustram as variações anuais e sazonais no fluxo do rio Ouémé, do rio Sota e do rio Zou. Todos os três rios apresentam fortes variações no fluxo anual ao longo dos últimos 60 anos. Alguns anos extremamente secos ocorreram na década de 1980, enquanto o período de 1998 a 2014 representa condições moderadamente úmidas no contexto histórico. Há uma forte sazonalidade no fluxo, com altos volumes de água de agosto a outubro durante a estação chuvosa. Alguns dos rios secam entre fevereiro e abril.

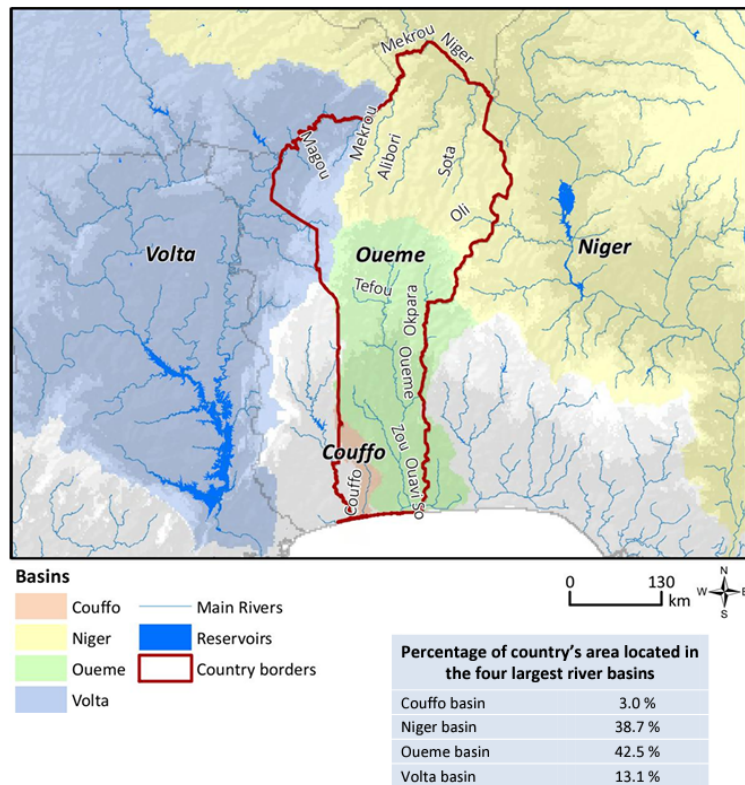


Figura 3.10: Bacias no Benin (Fonte: ECREEE).

O território do Benin é organizado em três regimes hidrológicos distribuídos no norte, centro e sul do país. De acordo com o PNUD (2010)[87]:

No sul do país, podem ser observadas duas estações chuvosas e a natureza relativamente impermeável do solo frequentemente resulta em escoamentos não permanentes.

A região central representa uma zona de transição em relação à pluviosidade, com áreas como a parte leste do departamento de *Collines*¹², onde o subsolo é granítico, podendo favorecer a infiltração subterrânea por vários meses.

O norte frequentemente experimenta uma longa temporada de chuvas intensas. A zona montanhosa do departamento de Atacora, devido à natureza impermeável de sua crosta superficial, sofre com períodos de estiagem pronunciados, enquanto a região nordeste ao redor de Kandi possui uma bacia sedimentar mais permeável, composta por arenitos porosos, o que torna os cursos d'água mais perenes.

Além disso, é importante destacar que o potencial hidrelétrico dos rios e afluentes depende de fatores como pluviosidade, hidrologia, geologia e relevo. No entanto, as duas principais bacias hidrográficas do Benin drenam cursos d'água com quedas de altitude baixas. Esses cursos d'água são modestos em termos de vazão e são caracterizados por um regime irregular.

De acordo com o relatório do PNUD mencionado anteriormente, a análise dos dados pluviométricos e hidrológicos permite "identificar áreas com potencial hidrológico aceitável em relação ao relevo, à natureza

¹²Subdivisão territorial chamada de Departamento de Collines

do solo e da cobertura vegetal. A zona mais chuvosa está localizada no eixo Natitingou-Kandi, na parte sul de Atacora e Alibori, e na parte norte de Donga, com predominância na região montanhosa de Atacora.

O PNUD propôs, em colaboração com o Banco Africano de Desenvolvimento, cerca de dez locais hidrográficos com potencial hidrológico para o desenvolvimento de mini-hidrelétricas. A Tabela 3.8 fornece uma visão geral desses locais. De acordo com o relatório intitulado "Proposta técnico-econômica de localidades a serem eletrificadas por meio de sistemas de energia renovável", um estudo encomendado pela ABERME em colaboração com a Agência Canadense de Desenvolvimento Internacional (ACDI) sobre micro-hidrelétricas no Benin, resultou em uma pré-seleção de locais potenciais determinados pelos seguintes critérios:

- Fluxo quase permanente (duração > 11 meses/ano)
- Vazão média adequada ($Q > 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Altura de queda suficiente (declividade longitudinal > 3)
- Acessibilidade ao local (12 meses)

Após uma pré-seleção de cerca de vinte locais potenciais, seis principais foram selecionados e nove foram rejeitados devido à insuficiência de vazão aproveitável.

Nome do site	Nome do rio	Departamento/Município	Potência máxima presumida (em kW)	Acesso existente	Restrições Ambientais
Cachoeiras de Sosso	Sota	ALIBORI/Kandi	750	Difícil	Nenhuma
Gbéssé	Sota	ALIBORI/Segbana	900	Fácil	Ponto de água para o gado na margem direita
Koutakroukrou	Iranée	ALIBORI/Kandi	100	Fácil	Floresta Classificada de Sota
Quedas de Kota	Kota	ATACORA/Natitingou	60	Fácil	Site turístico
Wabou	Tigou	ATACORA/Toucountouna	260	Difícil	Sítio sagrado
Kouporgou	Koumagou	ATACORA/Boukoumbé	60	Fácil	Nenhuma

Tabela 3.8: Os seis locais selecionados para o desenvolvimento de micro-hidrelétricas pelo estudo ABERME/ACDI. (Adaptado de [12])

Ao reunir os diversos dados apresentados acima e considerando uma lista de 82 locais de micro-hidrelétricas com potência média inferior a 4,4 MW, identificados desde 2005, com uma produção garantida de 194 GWh/ano e uma potência a ser instalada de 64 MW, o PNUD propôs uma cartografia em escala nacional dos locais de micro-hidroeletricidade por faixa de potência.

No entanto, a síntese mais recente é proveniente do relatório de 2017 encomendado pelo Segundo Compacto do Millennium Challenge Account (MCA II) e que trata do plano diretor de eletrificação off-grid (fora da rede) no Benin, na versão do projeto. Este documento inclui os 77 locais hidrelétricos selecionados pela Direção Geral de Energia e também se baseia no "GIS Hydropower Resource mapping and climate change scenarios for the ECOWAS Region" do ECREEE.

O relatório destaca que "muitos desses locais apresentam baixas taxas de operação, refletindo longos períodos de estiagem, e sua exploração não seria economicamente viável, considerando a predominância da geração de energia térmica". Da mesma forma, os autores enfatizam que a precisão dos dados fornecidos pela Direção Geral de Energia sobre esses projetos é questionável, devido às capacidades semelhantes relatadas para várias mini e micro-hidrelétricas.

De acordo com o estudo do *GIS Hydropower Resource Mapping*[88], o potencial teórico de energia hidrelétrica para o Benin foi estimado em 749 MW (período de referência 1998-2014), representando o

potencial total de todos os rios no país. O estudo também apresentou uma subdivisão do potencial total em diferentes tamanhos de usinas hidrelétricas, utilizando um esquema de classificação baseado no fluxo médio anual e no potencial hidrelétrico específico. Foram consideradas quatro classes de tamanho preferido de usina, incluindo pico/micro/mini HPP (<1 MW de capacidade instalada), pequenas HPPs (capacidade instalada de 1-30 MW), HPPs médias/grandes (capacidade instalada >30 MW) e a categoria "Sem potencial atrativo" para trechos de rio com potencial hidrelétrico específico muito baixo. Vale ressaltar que o estudo não avaliou o potencial técnico nesse contexto específico como resumido na Figura 3.11 a seguir:

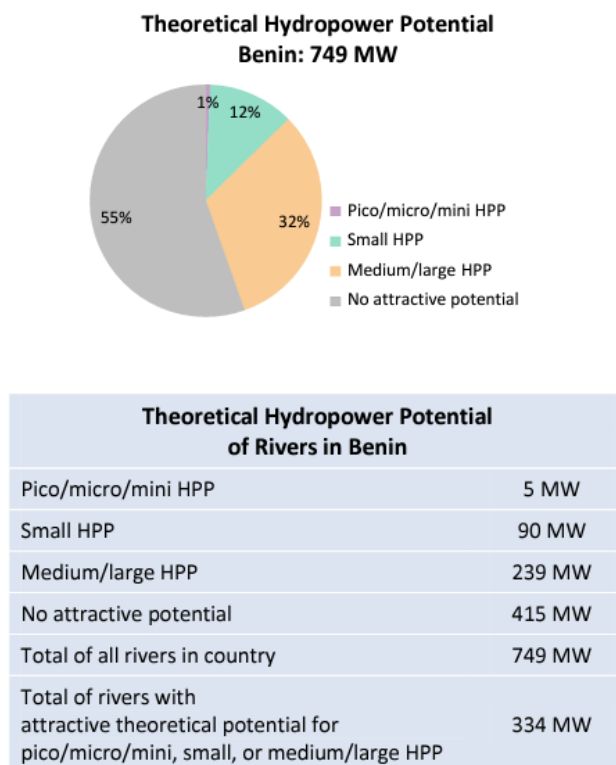


Figura 3.11: Bacias no Benin (Fonte:[7]).

Ao considerar que as bacias hidrográficas com potencial hidrelétrico teoricamente relevante estão localizadas no sudeste e noroeste do Benin, o relatório selecionou uma lista de 22 locais nessa região geográfica, excluindo os outros locais identificados como não conclusivos. A Tabela 3.9 abaixo apresenta esses locais, juntamente com suas capacidades teóricas.

Para concluirmos esta sub seção sobre o potencial hidroelétrico do Benin podemos dizer que diversos estudos foram realizados, resultando em estimativas diferentes da capacidade hidroelétrica do país. O PNUD propõe cerca de 7 MW de potência específica explorável, enquanto o relatório da ABERME/ACDI selecionou seis locais com uma potência total de apenas 2 MW. No entanto, outras fontes mencionam um potencial maior, com estimativas de até 624 MW de capacidade hidroelétrica.

A localização dos recursos hidroelétricos específicos identificados abrange principalmente as regiões central, sul, noroeste (região da cadeia de Atacora) e nordeste (bacia do Níger) do país. Além disso, foram mencionados alguns locais de maior capacidade, como Adjarala, Kétou, Olougbe e Okpara, que juntos

Nº	Nome da localidade	Potência teórica em kW
1	SINAISSIRE e PAPATIA	826
2	PERMA	272
3	HOUANVE-GOUDO	61
4	SOHOUE	24
5	BOUBOU CENTRE	16
6	KOUTAGOU	77
7	KOTA	137
8	KOKA e TANOUKOUNTA	1126
9	KOUPORGOU	729
10	TCHOUMI-TCHOUMI	722
11	KONIALOTIEKOU	704
12	WABOU	257
13	KETOU	67
14	KOUBEREPOU	410
15	MOUSSITINGOU	241
16	AKPAHOGO	51
17	KABOUA	84
18	AVAVI	304
19	WANSOHOU	109

Tabela 3.9: Alguns locais selecionados pelo IED após síntese com o GIS hydropower resource mapping. (Adaptado de [6] que foi tirado de [7])

totalizam 624 MW de potencial hidroelétrico.

No entanto, a exploração desses recursos enfrenta desafios devido às longas épocas de estiagem e à limitada capacidade de regularização do fluxo dos rios. Além disso, o regime hidrográfico dos rios beninenses ocorre predominantemente durante quatro meses do ano, o que dificulta a construção de barragens de grande capacidade. Atualmente, o país possui apenas uma microcentral hidrelétrica em Yéripao, com capacidade de 500 kW, que opera sazonalmente e contribui com apenas 0,20% do consumo de energia elétrica do Benin.

Em resumo, pode se dizer sem sombra de nenhuma dúvida que o Benin possui um potencial hidroelétrico estimado entre 7 MW e 330MW, distribuído em locais específicos em todo o país. No entanto, a exploração desses recursos enfrenta desafios devido às condições hidrológicas e à falta de infraestrutura adequada. É importante ressaltar que o Benin possui recursos hídricos onde podem ser desenvolvidas importantes usinas hidrelétricas, com um potencial real entre 100 e 200 MW garantidos (3 locais nos departamentos de Plateau e Couffo) e locais com capacidades mais baixas, entre 2 MW e 99 MW. No entanto, uma grande parte desse potencial consiste em energia secundária, devido aos longos períodos de estiagem e às limitações nas possibilidades de regularização do fluxo dos rios.

3.3.3 Potencial da energia solar fotovoltaica no Benin

Globalmente, a Terra recebe regularmente cerca de 170 milhões de gigawatts de energia solar, dos quais 122 gigawatts são absorvidos e aproximadamente 48 gigawatts são refletidos. As áreas que recebem a maior quantidade de luz solar estão localizadas nos trópicos áridos e, no continente africano, o Saara, o maior deserto quente do mundo, é a região com a maior duração de insolação.

No Benin, além de fornecer luz durante o dia, o sol é comumente utilizado para atividades como secagem de produtos (como peixe, carne, cereais etc.), madeira e carvão, secagem de roupas e produção tradicional de sal. Porém, nas últimas décadas, novas aplicações da radiação solar começaram a surgir no Benin, especialmente com a chegada das telecomunicações. A primeira aplicação tecnológica desses sistemas solares fotovoltaicos foi a instalação de redes de antenas telefônicas isoladas, conectadas à rede elétrica.

Em seguida, missionários estrangeiros cujos mosteiros estão localizados longe das áreas urbanas e suburbanas, muitas vezes em locais isolados e distantes dos aglomerados, começaram a adotar esse sistema. Em determinado momento, o governo do Benin também conduziu projetos para a criação de comunidades rurais alimentadas por sistemas energéticos solares, como centros de saúde comunitários e abastecimento de água para as aldeias. Esses projetos eram chamados de "villages solaires"; em português "aldeias solares" e a quantidade de radiação solar era ideal para alimentar esses dispositivos.

Para determinar os valores das taxas de irradiação em todo o território nacional, utilizaremos o "global horizontal irradiation" ou iluminação horizontal global, que é um indicador de medição da radiação solar que inclui tanto a taxa de radiação direta normal quanto a taxa de radiação difusa.

A radiação normal direta é a quantidade de radiação solar recebida por unidade em uma superfície sempre perpendicular aos raios solares, recebendo-os diretamente do céu, dependendo da inclinação do plano. Quanto à radiação difusa, é a quantidade de radiação recebida por unidade em uma superfície, composta pelos raios solares que não vêm diretamente da radiação solar, mas são dispersos devido às partículas e moléculas atmosféricas.

Assim, a iluminação horizontal global é definida como a quantidade de radiação solar de ondas curtas recebida do céu por uma superfície horizontal no solo. O cálculo desse dado é de particular interesse para sistemas solares fotovoltaicos, pois permite determinar a média da iluminação solar entre os raios que atingem perpendicularmente o solo e aqueles que são atenuados pela atmosfera. O mapa da figura 3.12 fornece uma visão geral da iluminação horizontal global no território do Benin e da quantidade de energia elétrica que poderia ser gerada por metro quadrado em um dia ou em um ano.

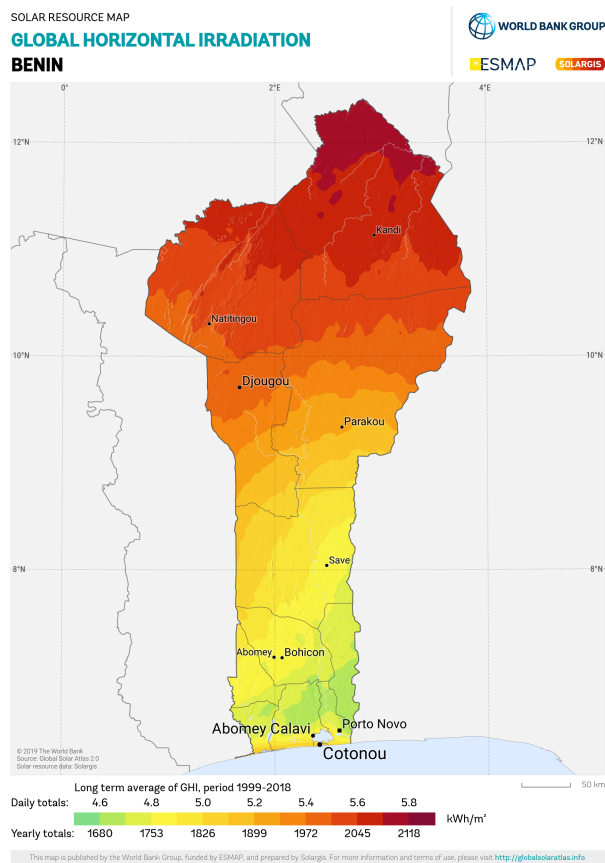


Figura 3.12: Irradiação Horizontal Global no Benin (Fonte: GLOBAL SOLAR ATLAS).

A radiação solar global horizontal do Benin pode ser subdividida em quatro principais zonas, em ordem decrescente do norte ao sul, de acordo com os dados do Banco Mundial corrigidos pelas medições locais da ASECNA. No norte, a zona que engloba os departamentos de Alibori e Atacora possui as taxas mais altas de radiação solar, por estar próxima de regiões subdesérticas. Em seguida, temos os departamentos de Donga e Borgou, que possuem radiações favoráveis em suas partes nortes. Nessa parte norte do país, a produção solar diária varia entre 5,8 kWh/m² e 5,3 kWh/m².

Na região que abrange metade sul dos departamentos de Borgou e Donga, todo o departamento de Collines e o norte dos departamentos de Mono, Zou e Plateau, incluindo as regiões costeiras, ou seja, o sul dos departamentos de Ouémé, Atlantique, Couffo e toda a região litorânea, apresentam uma produção solar média entre 5,2 kWh/m² e 4,8 kWh/m².

Por outro lado, as taxas de insolação mais baixas estão localizadas aproximadamente no sul do departamento de Plateau, no norte de Ouémé, no centro de Atlantique e parte do norte do departamento de Couffo. Essas taxas variam entre 4,7 kWh/m² e 4,5 kWh/m² aproximadamente.

As medições locais da ASECNA indicam valores aproximadamente semelhantes, com um potencial que varia entre 3,9 kWh/m²/dia e 6,2 kWh/m²/dia.

O potencial solar que essa irradiação pode fornecer foi determinado em quilowatt-hora por watt-pico em todo o território e é ilustrado pelo mapa da figura 3.13 a seguir:

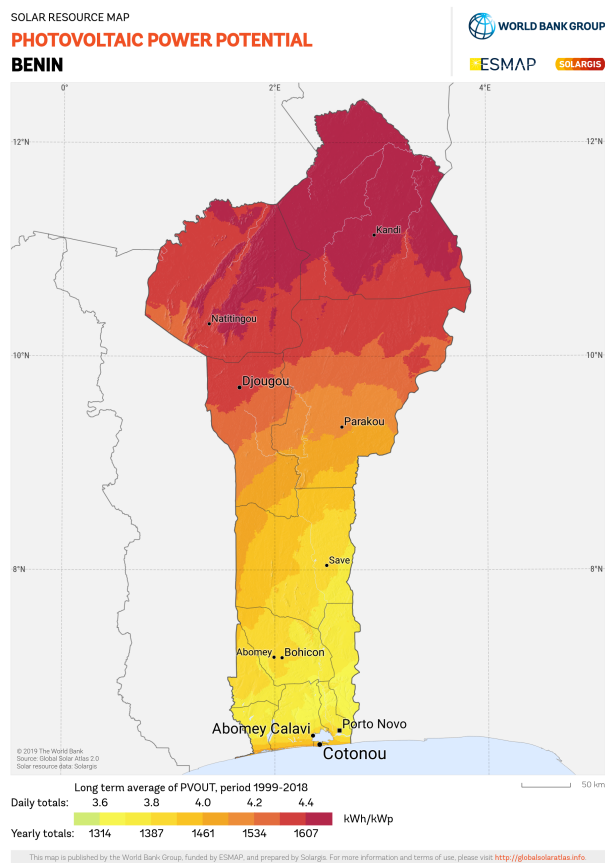


Figura 3.13: Produção específica de energia fotovoltaica no Benin (Fonte: GLOBAL SOLAR ATLAS).

Este mapa, que indica a capacidade de geração solar no Benin, mostra aproximadamente as mesmas variações que o mapeamento da radiação solar global horizontal e a energia elétrica correspondente por metro quadrado irradiado. Isso nos permite avaliar a quantidade de energia elétrica que um painel solar fotovoltaico de um watt-pico pode gerar.

Observa-se que nas regiões do norte do país, a energia elétrica que a energia solar poderia ajudar a produzir varia diariamente entre 4 kWh/kWp de potência do painel e 4,4 kWh/kWp. No centro e sul do país, com exceção de algumas regiões do sudeste, essa variação é de 3,6 kWh/kWp a 3,9 kWh/kWp. As regiões que produzem menos energia elétrica por potência dos painéis estão localizadas no nordeste do departamento do Atlântico, norte do departamento de Ouémé e sul do departamento de Zou.

No mesmo contexto, a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) avaliou o potencial técnico da energia solar fotovoltaica (ver figura 3.14), conectada ou não à rede, e identificou os potenciais solares de diferentes regiões do mundo e as potências que podem ser exploradas. De acordo com a IRENA, o Benin tinha uma capacidade instalada de energia solar de 2,9 MW em 2018 e teria produzido cerca de 5,3337 GWh de energia elétrica solar entre 2014 e 2018. Essa produção é resultado de diferentes projetos do governo do Benin e da UEMOA, cujo objetivo comum é valorizar a energia solar. Essas iniciativas permitiram a implementação de milhares de postes de iluminação solar fotovoltaica em todo o território e cerca de 105 micro usinas solares. A figura a seguir mostra, entre outras coisas, a curva de progresso da produção de energia elétrica por meio de sistemas solares.

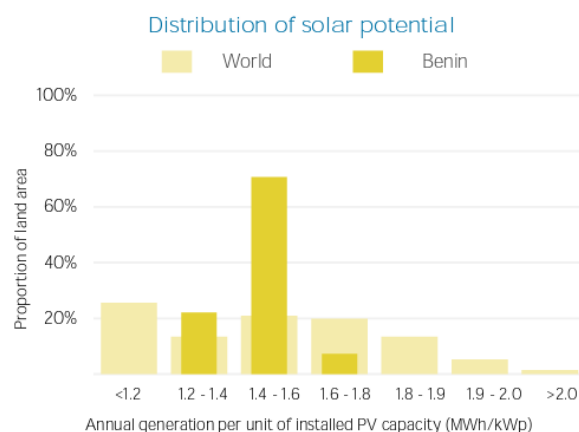


Figura 3.14: Distribuição do potencial solar no Benin em comparação com o mundo (Fonte: Energy Profile - Benin - IRENA[8]).

Em conclusão à esta sub-seção sobre o potencial da energia solar no Benin, pode se dizer que o Benin possui um grande potencial em energia solar, com taxas de irradiação solar favoráveis em todo o país. As regiões do norte têm as taxas mais altas de radiação solar, variando entre 4 kWh/kWp e 4,4 kWh/kWp. No centro e sul do país, essa variação é de 3,6 kWh/kWp a 3,9 kWh/kWp, com algumas regiões do sudeste apresentando taxas semelhantes. Por outro lado, as regiões localizadas no nordeste do departamento do Atlântico, norte do departamento de Ouémé e sul do departamento de Zou têm as taxas mais baixas, entre 3,6 kWh/kWp e 3,9 kWh/kWp. O país já possui uma capacidade instalada em energia solar de 2,9 MW e produziu cerca de 5,3337 GWh de energia elétrica solar entre 2014 e 2018, resultado de diversos projetos governamentais e iniciativas da UEMOA. A utilização desse potencial solar pode contribuir significativamente para a geração de energia elétrica e o desenvolvimento sustentável do país.

3.3.4 Potencial em energia eólica no Benin

O Benin possui um potencial eólico significativo em todo o seu território. As principais fontes de dados sobre o vento são as estações sinóticas, como aquelas fornecidas pela Agência para a Segurança da Navegação Aérea (ASECNA). No entanto, há também dados mais precisos disponíveis, obtidos por meio de satélites, que cobrem todo o país. Um exemplo disso é o "Windatlas", que é a maior base de dados atualizada do mundo sobre velocidades do vento e parâmetros relacionados a 50 m, 100 m e 200 m de altura.

Ao analisar os dados do "Windatlas" da Universidade Técnica da Dinamarca, foi possível identificar as regiões mais propícias para a implantação de fazendas eólicas no Benin. Observou-se que, à uma altura de 50 m, apenas as regiões costeiras extremo sul do país e o noroeste, na região da cadeia de Atacora, apresentam velocidades de vento entre 4,25 m/s e 4,75 m/s como mostra a figura 3.15. Deve-se observar também que algumas poucos municípios nos departamentos de Couffo, Zou, Borgou e Alibori possuem potencial para a exploração dos ventos. No entanto, o espaço mais favorável para um parque eólico a 50 metros de altitude é, sem dúvida, a zona econômica exclusiva na área marítima do país. Nesse local, as velocidades dos ventos variam de um mínimo de 5 m/s até 6,25 m/s. É importante ressaltar que os ventos

que fluem ao longo das encostas das montanhas são frequentemente rápidos e podem se tornar violentos à medida que a altitude aumenta.

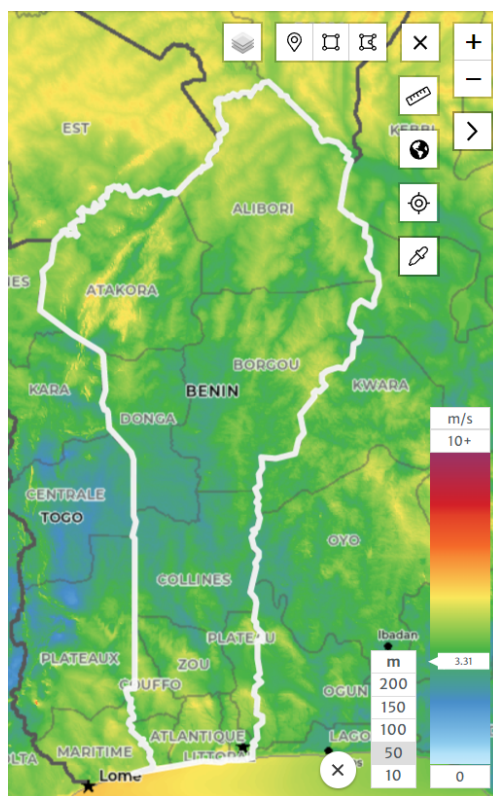


Figura 3.15: Mapa da velocidade do vento no Benin a uma altura de 50 m (Fonte: Global Wind Atlas, 2023).

A análise dos dados a uma altura de 100 m revelou uma variação significativa na velocidade do vento e uma ampliação do espaço potencial para aproveitamento desse recurso (ver figura 3.16). As partes meridionais e setentrionais do Benin apresentam valores confortáveis de velocidade do vento, variando de 4,25 m/s a 6,25 m/s. Os departamentos de Littoral, Atlantique, Ouémé, Mono, Couffo e Zou representam as regiões com maior concentração de potencial eólico ao sul. Ao norte, os ventos mais rápidos estão localizados acima de uma área com relevo muito íngreme. As comunas de Borgou e Alibori também apresentam velocidades médias de 5 m/s.

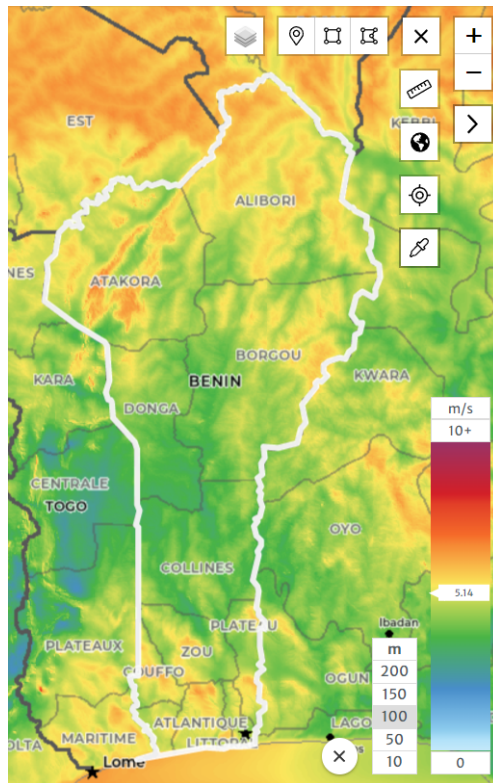


Figura 3.16: Mapa da velocidade do vento no Benin a uma altura de 100 m (Fonte: Global Wind Atlas, 2023).

À medida que a altitude aumenta, a região costeira fornece a maior capacidade de potência eólica. A uma altura de 200 m, em todo o território nacional, as velocidades aproximadas do vento foram extrapoladas utilizando modelos comerciais de modelagem numérica e as fórmulas de extrapolação dos parâmetros de Weibull. Os resultados indicam que o potencial eólico na Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Benin a 80 m de altura atinge valores de até 774,0906 W/m² em algumas áreas (ver figura 3.17), classificados como classe 6, de acordo com os padrões do NREL (National Renewable Energy Laboratory). Além disso, observa-se que os valores máximos aparecem em torno da latitude 6°N, que corresponde à costa. Também é importante observar que as linhas de iso-potencial nas proximidades das latitudes 3,5°N também apresentam valores muito elevados.

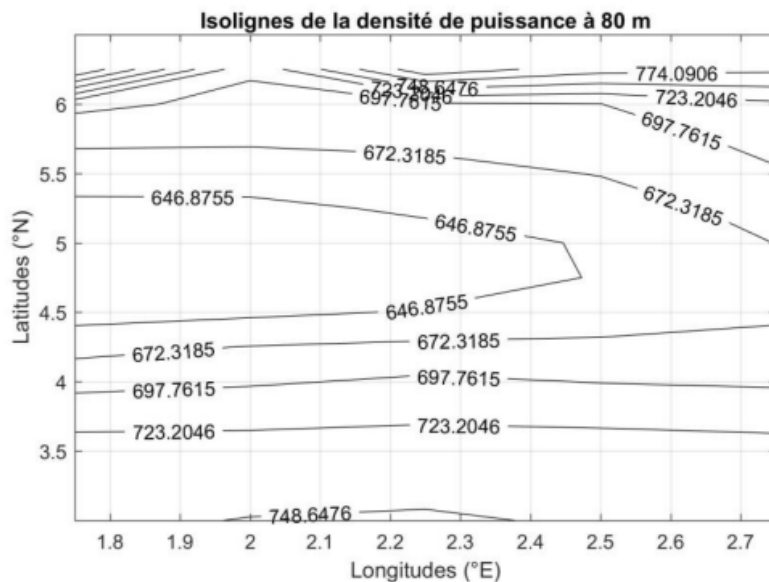


Figura 3.17: Densidade de potência eólica a 80 m (Fonte: [9]).

A Figura 3.18 tirada de um Estudo do Potencial de Energia Eólica Offshore do Benin [89] apresenta a distribuição do potencial eólico a 100 m na ZEE do Benin. Nessa figura, a densidade de potência disponível a 100 m de altura varia entre 769,6 W/m² e 949,2 W/m². As áreas com alto potencial estão localizadas perto da costa (próximo à latitude 6,5°N) e em alto mar (próximo à latitude 3°N). De acordo com o padrão do NREL [20], esse potencial pode ser classificado na classe 5 ($670 \text{ W/m}^2 \leq P \leq 820 \text{ W/m}^2$). No entanto, em algumas partes da ZEE, ele atinge a classe 6 ($820 \text{ W/m}^2 \leq P \leq 1160 \text{ W/m}^2$). De acordo com o padrão do NREL, um potencial de classe 5 é considerado uma excelente fonte potencial de geração de energia elétrica. Da mesma forma, uma fonte de classe 6 é considerada tendo um potencial excepcional para geração de energia eólica.

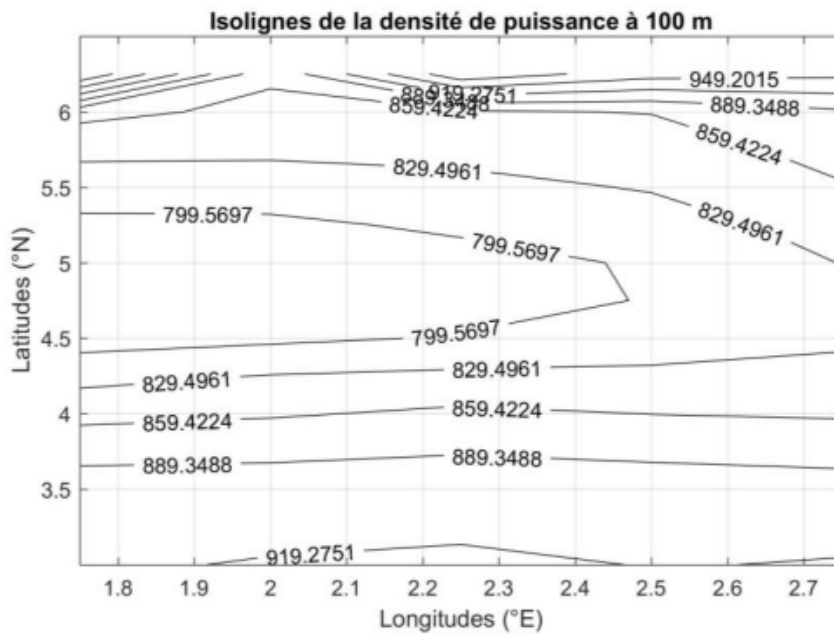


Figura 3.18: Densidade de potência eólica a 100 m (Fonte: [9]).

A distribuição da densidade de potência disponível a uma altura de 120 m é apresentada na Figura 3.19. O potencial eólico offshore no Benin a 120 m varia entre 924,3 W/m² e 1233,5 W/m². De acordo com o padrão de classificação de sites eólicos do NREL, o potencial eólico na ZEE é classificado como classe 6.

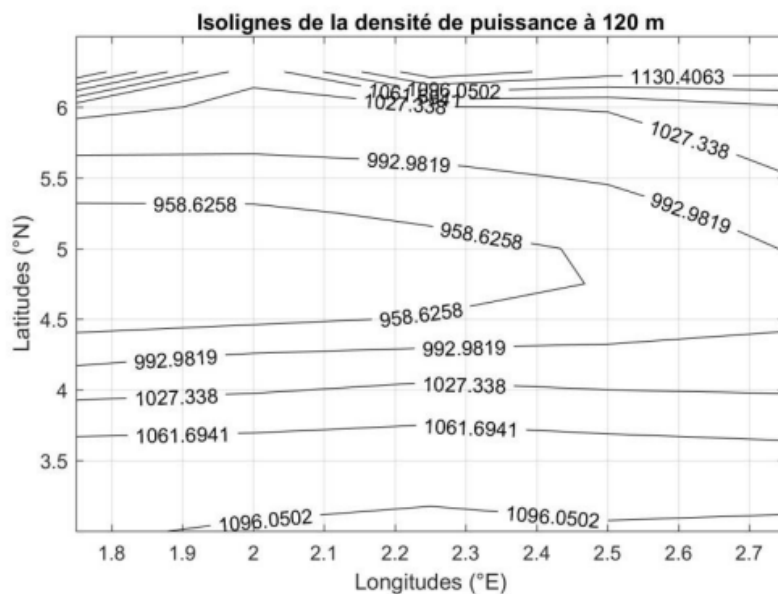


Figura 3.19: Densidade de potência eólica a 120 m (Fonte: [9]).

De outro lado, segundo outro estudo do PNUD[87] apenas a região central do país, ao longo de um eixo noroeste/sudeste, ou seja, Donga e Collines, apresenta velocidades de vento baixas, em torno de 4 m/s, o que é suficiente apenas para colocar os rotores das turbinas eólicas em movimento.

No entanto, enquanto o norte do departamento de Donga é ventoso o suficiente, o Atakora apresenta um potencial atrativo, quanto à região sul, ela não é quase adequado para aproveitamento pelo fato de ser não haver nenhuma área propícia para instalação com excessão da zona costeira e do alto mar para instalação de um parque offshore. No caso das Collines, há uma distribuição desigual do fluxo de vento, o que significa que apenas o centro rochoso e algumas áreas apresentam ventos entre 4 m/s e 5,25 m/s.

A região norte no departamento de Atakora, a região costeira assim como o alto mar fornecem a maior capacidade de energia eólica. Mas quais são as velocidades aproximadas do vento a 200 m de altitude em todo o território nacional?

Embora os grandes aerogeradores geralmente tenham entre 120 e 155 m de altura, em 2017, o maior aerogerador tinha 187 m de altura e uma potência de 9,5 MW. Em 2019, o protótipo do Haliade X, instalado em Rotterdam, tinha uma potência de 12 MW e atingia 260 m de altura.

Foram utilizados modelos comerciais de modelagem numérica de velocidades do vento para extrapolar os valores dessa fonte do sul ao norte do país a 40 m, 50 m e 60 m de altitude, a partir dos dados das estações meteorológicas do Benin. Para um fator de cisalhamento igual a 0,1, obtemos os valores mencionados na tabela 3.20 a seguir.

Fator de cisalhamento = 0.1						
Região do país	Altura (m)	40	50	60	Curva de Potência (kW)	Energia produtivel (kWh)
	Velocidade do vento a uma altura de 12 m	Velocidades (m/s)				
Zona costeira	4	4.51	4.61	4.7	47.30	44501
	5	5.64	5.77	5.87	100.10	94703
	6	6.77	6.92	7.05	181.40	162561
Zou/Collines	2	2.26	2.31	2.35	-	-
	3	3.38	3.46	3.52	-	-
Atacora/Alibori	1	1.13	1.15	1.17	-	-
	2	2.26	2.31	2.35	-	-

Figura 3.20: Potencial eólico e Velocidades dos ventos a diversas alturas com um fator de cisalhamento $\alpha = 0.1$ (Fonte: [10]).

Com esses dados, o PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento) elaborou um mapa das áreas favoráveis para a instalação de aerogeradores, com base nos fatores de cisalhamento e nas altitudes de 40 m, 50 m e 60 m. As medições de vento das estações sinópticas da ASECNA (Agência para a Segurança da Navegação Aérea na África e Madagascar), feitas a 10-12 m de altura, também indicam que apenas a faixa costeira possui um potencial apreciável e velocidades de vento constantes ao longo do ano. Essas velocidades variam de 4 a 6 m/s na zona costeira e de 1 a 2 m/s no norte do país.

No entanto, essas velocidades de vento não são relevantes para incentivar investimentos em projetos eólicos. Seria oportuno realizar estudos em todo o território nacional para determinar as velocidades reais do vento em várias altitudes, de 30 m a 200 m, e sua frequência. Com esses resultados, seria possível decidir sobre o desenvolvimento de microprojetos eólicos para uso local ou grandes projetos de hibridização de energia, de acordo com as potencialidades dos locais, a fim de distribuir a energia elétrica gerada para

outras localidades.

Especificamente na parte sul do Benin, a demanda por energia elétrica é alta e o desenvolvimento de energia eólica em larga escala poderia ser realizado em áreas não turísticas ou não funcionais, mas esses empreendimentos ainda enfrentam grandes desafios.

Os dados do PNUD confirmam os resultados anteriores obtidos a partir das medições do "Global Wind Atlas", especificando que as áreas costeiras são as mais adequadas para o desenvolvimento de parques eólicos. No entanto, os valores de velocidade do vento na simulação do PNUD são significativamente mais altos. Por exemplo, a variação de velocidade nas costas a 50 m de altitude é de 4,61 m/s a 6,92 m/s, enquanto no Global Wind Atlas varia de 4,5 m/s a 5,5 m/s. Ao analisar os mesmos dados no ECOWAS Map View, observa-se que ele representa a média dos dois valores anteriores, ou seja, uma variação de velocidade do vento entre 4,5 m/s e 6,3 m/s.

No entanto, é importante notar que os dados do PNUD para outras regiões, como Zou/Collines e Atacora/Alibori, são muito mais baixos do que os das duas outras regiões.

Por exemplo, as velocidades do vento na região norte do país, de acordo com o ECOWAS Map View, variam entre 4 m/s e 5 m/s, e no Global Wind Atlas, também a 50 m de altura, variam entre 4 m/s e 5 m/s. No entanto, apenas os valores do PNUD estão entre 1,15 m/s e 2,31 m/s.

Para determinar o efeito do movimento multidirecional do vento, o fator de cisalhamento foi aumentado de 0,1 para 0,4, e observa-se que as velocidades do vento calculadas são maiores. Os resultados da simulação estão apresentados na tabela 3.21 a seguir.

Fator de cisalhamento = 0.4						
Região do país	Altura (m)	40	50	60	Curva de Potência (kW)	Energia produtivel (kWh)
	Velocidade do vento a uma altura de 12 m	Velocidades (m/s)				
Zona costeira	4	6.47	7.08	7.61	181.40	162561
	5	8.09	8.85	9.52	393.50	271626
	6	9.71	10.62	11.42	643.20	285666
Zou/Collines	2	3.24	3.54	3.81	13.20	11471
	3	4.86	5.31	5.71	100.10	94703
Atacora/Alibori	1	1.62	1.77	1.9	-	-
	2	3.24	3.54	3.81	13.20	11471

Figura 3.21: Potencial eólico e Velocidades dos ventos a diversas alturas com um fator de cisalhamento $\alpha = 0.4$ (Fonte: [10]).

Em resumo, o Benin possui um potencial eólico considerável, especialmente nas regiões costeiras, na parte do noroeste (no departamento de Alibori e Atacora) e em alto-mar. À medida que a altitude aumenta, as velocidades do vento tendem a aumentar, ampliando ainda mais as oportunidades para a utilização desse recurso renovável. A exploração desse potencial pode contribuir significativamente para a produção de energia elétrica no país.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta a discussão dos resultados oriundos da aplicação do método desenvolvido para a determinação do limite de penetração de GDFV na rede de distribuição hipotética. Da análise desses resultados são obtidas regras práticas, as quais são aplicadas a um alimentador real, como estudo de caso.

4.1 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BENIN

O consumo final de eletricidade no Benin tem sido um desafio nos últimos anos. O país enfrenta uma demanda crescente de energia devido ao rápido crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico. Hoje, o país conta com cerca de 13 milhões de habitantes. De acordo com o gráfico (ver figura 4.1) do consumo final anual em eletricidade entre 2010 e 2021 no Benin, observa-se um aumento significativo na demanda energética do país. Em 2010, o consumo final era relativamente baixo, atingindo aproximadamente 841,62 GWh. No entanto, ao longo dos anos, houve um incremento constante nesse indicador, com um aumento médio anual de 6,5% entre 2011 e 2015, de 5,1% entre 2016 e 2019 e finalmente de 13,3% de 2020 para 2021 atingindo 1408,5 GWh. Isso reflete um aumento substancial em relação ao período inicial analisado (2010). Essa tendência ascendente no consumo final de eletricidade no Benin evidencia o crescimento econômico do país, a expansão de atividades comerciais e industriais, bem como a melhoria do acesso à energia elétrica para a população, desempenhando um papel vital no desenvolvimento e na qualidade de vida dos beninenses.

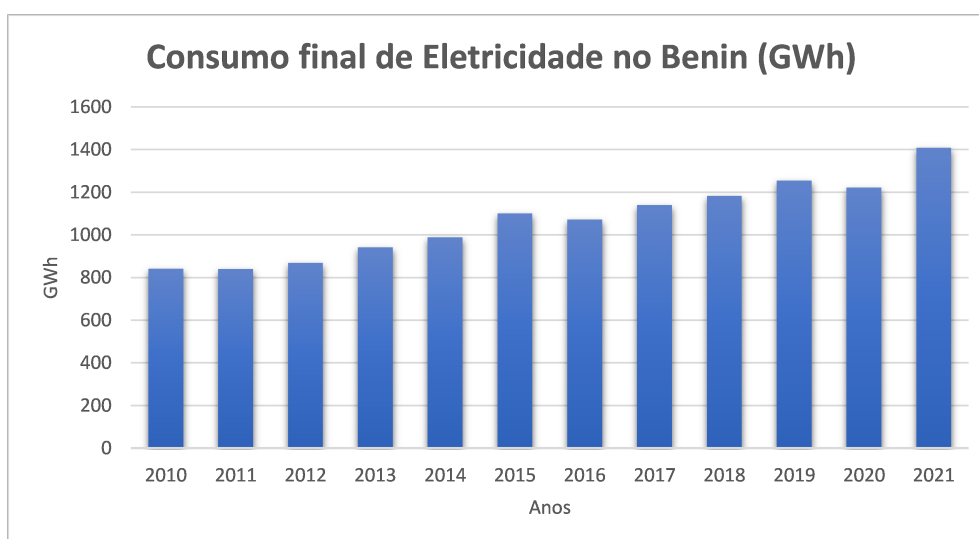


Figura 4.1: Consumo final de Eletricidade no Benin (GWh) (Fonte: SIE-Benin).

4.1.1 Energia total Alvo para atingir 3265 kWh per capita no Benin

Com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento e garantir que o Benin alcance a meta de consumo médio mundial de energia elétrica per capita através da proposta de um mix de fonte renováveis, possibilitando um melhor bem-estar e qualidade de vida para sua população, ao analisar o consumo final de energia elétrica no Benin em 2021 considerando a população do país neste mesmo ano, observa-se um número significativamente inferior em comparação à média mundial. Com apenas cerca de 120 kWh per capita anualmente, o país apresenta uma lacuna considerável em relação aos 3265 kWh per capita registrados globalmente. No entanto, em busca de um futuro mais sustentável e alinhado aos padrões internacionais, é imperativo que medidas sejam tomadas para aumentar esse consumo até o horizonte 2050.

Para se alcançar essa média mundial $M_{mundial}$, o Benin teria que consumir anualmente uma quantidade de energia E_{cons} dada pela equação 4.1:

$$E_{cons} = M_{mundial} \times N_h \quad (4.1)$$

Onde:

- E_{cons} é a energia elétrica total que precisa ser consumida anualmente no Benin ate 2050 para atingir um consumo per capita igual à média mundial atual;
- N_h é o número de habitantes no Benin;

4.1.2 Distribuição da energia a ser gerada pelo mix proposto por fontes

Através dos diversos potenciais apresentados na seção anterior, foi possível avaliar o potencial específico de cada uma dessas fontes no território beninense. Dentre elas, destaca-se o solar fotovoltaico, a hidrelétrica e a biomassa que se apresentam como fontes com alta capacidade de geração de energia elétrica no Benin

Com base nesse potencial, a proposta é alocar uma parcela significativa da energia total a ser gerada pelo mix de fontes renováveis à bioenergia. A decisão de atribuir 40% da energia total a essa fonte justifica-se pelo seu potencial superior em relação às demais. Para a energia solar fotovoltaica, será alocado cerca de 35% da energia total a ser gerada pelo mix. Além disso, a utilização da hidrelétrica e eólica também desempenha um papel fundamental na diversificação da matriz energética, permitindo uma complementaridade entre as fontes.

A bioenergia, obtida a partir de fontes renováveis como biomassa e resíduos orgânicos, possui um potencial considerável no Benin. Sua utilização, representando 40% da energia total a ser gerada, contribuirá para a sustentabilidade energética e para o aproveitamento adequado dos recursos disponíveis no país.

A energia hidrelétrica, proveniente do aproveitamento do potencial hídrico, também desempenha um papel relevante na geração de energia limpa e renovável. Desta forma, alocar 20% da energia total ao uso dessa fonte permitirá aproveitar os recursos hídricos existentes no Benin, sem comprometer o equilíbrio ambiental. Essa proporção foi alocada para a geração de energia elétrica pela hidrelétrica pelo fato do

potencial de todos os sites repertoriados em todo o território serem fracos com quantidade anual produtível fraca na maioria dos sites.

Por fim, a energia eólica, proveniente da força dos ventos, embora com um potencial menor em relação às outras fontes, também será aproveitada, representando 5% da energia total gerada pelo mix de fontes renováveis proposto. A sua inclusão permitirá diversificar ainda mais a matriz energética, reduzindo a dependência de uma única fonte e promovendo a resiliência do sistema elétrico.

A tabela 4.1 a seguir resume tal distribuição:

Fonte de energia renovável	Proporção de energia a ser gerada (%)
Solar Fotovoltaica	35%
Hidrelétrica	20%
Bioenergia	40%
Eólica	5%

Tabela 4.1: Distribuição da energia total a ser gerada por tipo de Fonte. (Fonte: O autor)

4.2 CALCULO DA ENERGIA DEMANDADA E USINA PARA GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO PARA CADA FONTE COMPODO O MIX PROPOSTO

4.2.1 Sistema fotovoltaico

Com o objetivo de impulsionar o consumo per capita de energia elétrica no Benin até alcançar a média mundial, propõe-se a implementação estratégica de sistemas fotovoltaicos em diferentes departamentos do país. Com base na análise do potencial solar disponível, identificou-se áreas-chave para instalação dos sistemas. No departamento do Littoral e Atlantique, especificamente em Cotonou e em Tori-Bossito, planeja-se colocar um sistema fotovoltaico conectado à rede. Além disso, em Cotonou, serão aproveitados os tetos de prédios administrativos para micro-geração de energia. Também, serão implementados sistemas fotovoltaicos no centro do país, nos departamentos de Zou e Collines. Por fim, serão alocados sistemas fotovoltaicos de médio e grande porte no norte do país, nos departamentos de Alibori, Atacora e Donga. Essa abordagem estratégica permitirá que aproximadamente 35% da energia necessária para atingir o consumo médio anual per capita seja gerada por meio desses sistemas, contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável e a redução da dependência de fontes tradicionais de energia.

Para este efeito, pode-se calcular o consumo diário com o sistema fotovoltaico $E(solar)_{cons/dia}$ a partir do consumo total anual E_{cons} . Tal consumo é dado pela equação 4.2. A usina será do tipo SFVCR com sistema de armazenamento de energia através de banco de baterias e do tipo Offgrid em outros lugares mais afastados e com interligação precária.

$$E(solar)_{cons/dia} = \frac{E_{cons} \times 0,35}{365} \quad (4.2)$$

Segundo o Plano Estratégico do Ministério da Energia do Benin[90], os diferentes estudos realizados

no Benin para determinar o potencial solar revelam que as médias mensais de irradiação diária, com uma duração de insolação de 7 horas por dia, variam de 3,9 kWh/m² no sul a 6,1 kWh/m² no norte, o que representa um potencial significativo que pode ser aproveitado. O potencial de desenvolvimento da energia solar no Benin é considerado significativo:

- No norte, a produção é da ordem de 1560 kWh/kWp instalado por ano; o que representa em média, 130 kWh/kWp/mês;

Em dezembro e março, os valores máximos são de 150 kWh/kWp/mês;

Em junho, o valor mínimo é de 90 kWh/kWp/mês;

- Na parte central do país, a produção é de 1.460 kWh/kWp instalado por ano;

- No sul e em áreas úmidas, a produção é de 1.400 kWh/kWc instalado por ano.

Esses dados demonstram o potencial considerável do Benin para o desenvolvimento da energia solar em diferentes regiões do país. O aproveitamento desse potencial pode contribuir para diversificar a matriz energética, reduzir a dependência de fontes não renováveis e promover o acesso à eletricidade em áreas rurais e remotas.

Com a duração de insolação de 7 horas por dia na região setentrional do país também chamada de Horas de Sol Pleno (HSP), pode-se calcular o fator de capacidade FC_{solar} das potenciais usinas fotovoltaicas a serem construídas através da equação 4.3 a seguir:

$$FC_{solar} = \frac{HSP \times 100\%}{24h} \quad (4.3)$$

onde:

- HSP é a quantidade de tempo (em horas) durante o qual o sol está acima do horizonte e a radiação solar é mais intensa.

Pelo fato da região Norte apresentar um potencial relativamente maior que a região central e a região do sul, vamos distribuir a proporção da energia a ser gerada pela fonte solar fotovoltaica da seguinte maneira entre as regiões:

Regiões	Proporção de energia a ser gerada (%)
Norte	50%
Centro	35%
Sul	15%

Tabela 4.2: Distribuição da energia total a ser gerada por região. (Fonte: O autor)

Um ponto importante a esclarecer é que o objetivo deste trabalho não é de apresentar de forma detalhada o dimensionamento as usinas geradoras de energia elétrica para cada fonte que este trabalho considerará para a proposta do mix 100% renovável. Portanto, vamos apresentar parcialmente o processo de dimensionamento da usina a ser implementada na região sul do país indicando claramente a quantidade de energia a ser gerada, a energia demanda assim que a energia a ser armazenada no ciclo noturno. Uma vez esses parâmetros conhecidos, vamos proceder à verificação da viabilidade técnica e física da implementação da usina

a ser implementada no sul nos baseando em um trabalho de conclusão de curso[91] sobre a viabilidade técnica de geração solar fotovoltaica para o Distrito Federal onde se apresenta todo o processo de dimensionamento de uma usina solar fotovoltaica susceptível de suprir 100% da demanda em energia elétrica do Distrito Federal. Vamos então fazer uma comparação entre as energias demandadas a serem geradas por ambos os sistemas fotovoltaicos e de acordo com o porte¹ da usina dimensionada, vamos verificar se seria possível a implementação tão técnica quanto física da usina solar fotovoltaica que suprirá com 15% da energia a ser gerada pela energia solar no sul do país.

Por isso, a energia diária a ser gerada (15%) pelo sistema fotovoltaica na região sul é dada pela equação 4.4

$$E(solar)_{sul/dia} = E(solar)_{cons/dia} \times 0,15 \quad (4.4)$$

onde:

- $E(solar)_{cons/dia}$ é a quantidade de energia a ser gerada usando o solar fotovoltaico.

Com a energia diária a ser gerada $E(solar)_{cons/dia}$ pode-se obter uma representação mais clara do comportamento do consumo de energia ao longo das horas do dia é estimar uma curva de consumo diário tendo como base o a curva de consumo diário total do país (ver figura 4.2). Embora esteja se tratando somente da parte sul do país, foi usado a curva de consumo diário do país todo; primeiro pelo fato de não termos conseguido a curva de consumo diário para esta região específica e segundo pelo fato de estar surdimensionando propositalmente o sistema para proporcionar mais energia elétrica para o consumo da população.

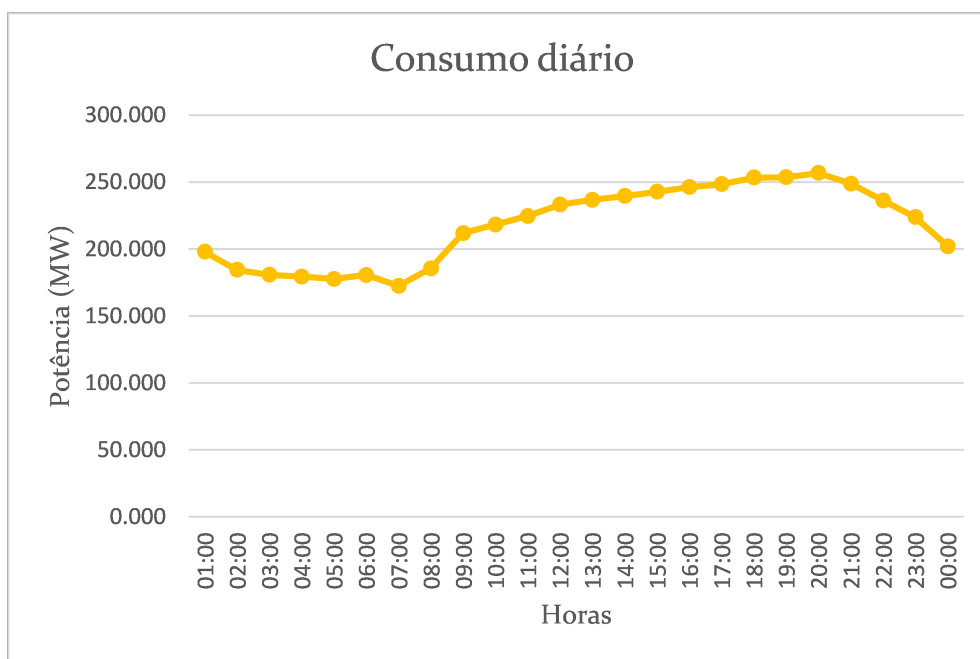


Figura 4.2: Curva de consumo diário total do país. (Fonte: dados fornecidos pela SBEE).

A região sul sendo objeto de análise para este dimensionamento do sistema fotovoltaico, foram usados

¹considerando, número de inversores, controladores de carga, módulos utilizados, superfície ocupada etc...

os dados fornecidos pela Agence Nationale de la Météorologie du Bénin (METEO-BENIN)² a respeito da irradiação média anual no plano inclinado da região onde se pretende instalar a usina. Tal irradiação foi de $4,847 \text{ kWh}/\text{m}^2.\text{dia}$ segundo os dados fornecidos pela METEO-BENIN.

A seguir pode se calcular a energia total a ser gerada (E_{demand}) para disponibilizar a quantidade suficiente de energia para o consumo da população da região sul do país através da equação 4.5 a seguir:

$$E_{demand} = E(solar)_{sul/dia} - E_{noturno} + E_{storage} \quad (4.5)$$

Onde:

- E_{demand} é a energia a ser gerada por dia;
- $E_{noturno}$ é a energia demandada no ciclo noturno;
- $E_{storage}$ é a energia a ser gerada para o sistema de armazenamento.

Devido ao caráter intermitente da luz do sol, as usinas fotovoltaicas enfrentam períodos de sazonalidade, como a noite, em que não conseguem gerar energia devido à falta de luz solar incidente nos painéis solares. O gráfico da figura 4.3 mostra a projeção da curva de consumo diário alvo (a curto ou médio prazo³) da região sul do país em comparação com a curva de geração de energia fotovoltaica, durante o intervalo das 18:00 até as 07:00 horas do dia seguinte, o sistema fica inoperante devido à ausência de luz solar. Podemos observar que a soma das **Áreas 1 e 3** representa a energia demandada durante o ciclo noturno ($E_{noturno}$), enquanto a **Área 2** indica o momento em que a energia consumida é igual à energia gerada. Por fim, a **Área 4** representa a energia que precisa ser armazenada para suprir a demanda durante esses períodos sem geração.

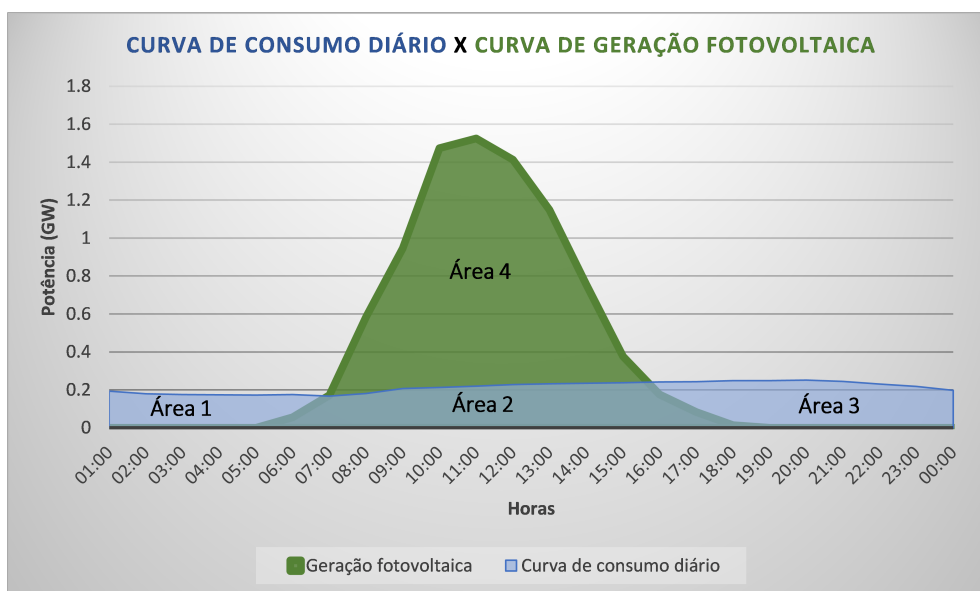


Figura 4.3: Gráfico ilustrando uma visão comparativa das Curvas de Consumo Diário de Energia Elétrica na Região e de Geração (Fonte: O Autor)

²<https://meteobenin.bj/>

No processo de cálculo do valor da energia total a ser gerada pelo sistema (E_{demand}) é primordial determinar não somente a energia demandada no ciclo noturno ($E_{noturno}$) mas também a energia a ser gerada para o sistema de armazenamento ($E_{storage}$). Porém, para a obtenção de $E_{noturno}$ e $E_{storage}$, precisamos saber:

- A eficiência do sistema de armazenamento (η_{ARM});
- A Irradiância global (I_{GLO}) média anual no plano inclinado no local da instalação.

Uma medida muito importante a saber é a eficiência total do sistema de armazenamento ($\eta_{storage}$) que é determinada multiplicando-se as eficiências individuais de todos os componentes envolvidos, como a eficiência da bateria (η_b), a eficiência do inversor escolhido (η_{inv}) e a eficiência do controlador de carga ($\eta_{control}$). No nosso caso específico, o cálculo da eficiência do sistema de armazenamento ($\eta_{storage}$) não envolvera a eficiência do controlador de carga já que não vamos precisar dimensionar um controlador de carga para o sistema pelo fato do inversor a ser escolhido vem com um controlador de carga embutido. A equação 4.6 a seguir expressa a eficiência do sistema de armazenamento.

$$\eta_{storage} = (\eta_{inv}) \times \eta_b \quad (4.6)$$

Podemos então determinar a energia a ser gerada para o sistema de armazenamento ($E_{storage}$) por meio da equação 4.7, que nos fornece o valor necessário para dimensionar adequadamente o armazenamento de energia.

$$E_{storage} = \frac{E_{noturno}}{\eta_{storage}} \quad (4.7)$$

4.2.1.1 Localização da UFV e suas características

A usina terá sua implementação na parte sul do país especificamente na cidade de Golo-Djigbé. É uma cidade localizada no Departamento de Atlantique, no sul do Benin. É uma divisão administrativa sob a jurisdição de Abomey-Calavi. Fatores como a irradiância global (I_{GLO}) e a temperatura da região desempenham um papel crucial no dimensionamento de uma usina fotovoltaica. Ao obter os dados de coordenadas do local escolhido, é possível acessar informações sobre a irradiância global média (I_{GLO}) do site da global solar Atlas (ver figura 4.4) assim como a irradiância global horária em um dia qualquer fornecido pelo Instituto de meteorologia do Benin (Meteo-Benin) (ver figura 4.5). Esses dados são utilizados para calcular as Horas de Sol Pleno (HSP), que representam a quantidade diária de horas em que a irradiância solar permanece constante e igual a $1 \text{ kW}/\text{m}^2$. Essa medida é fundamental para estimar a disponibilidade de radiação solar na região e, conseqüentemente, dimensionar adequadamente a usina fotovoltaica. Através dessas informações, é possível realizar uma análise precisa e otimizar o projeto da usina.

$$HSP = \frac{I_{GLO}}{1 \text{ kW}/\text{m}^2} \quad (4.8)$$

GLOBAL SOLAR ATLAS

BY WORLD BANK GROUP

Abomey-Calavi

06.487254°, 002.368157°
 unnamed road, Abomey-Calavi, Atlantique Department, Benin
 Time zone: UTC+01, Africa/Porto-Novo [WAT]

🕒 Report generated: 9 Jun 2023

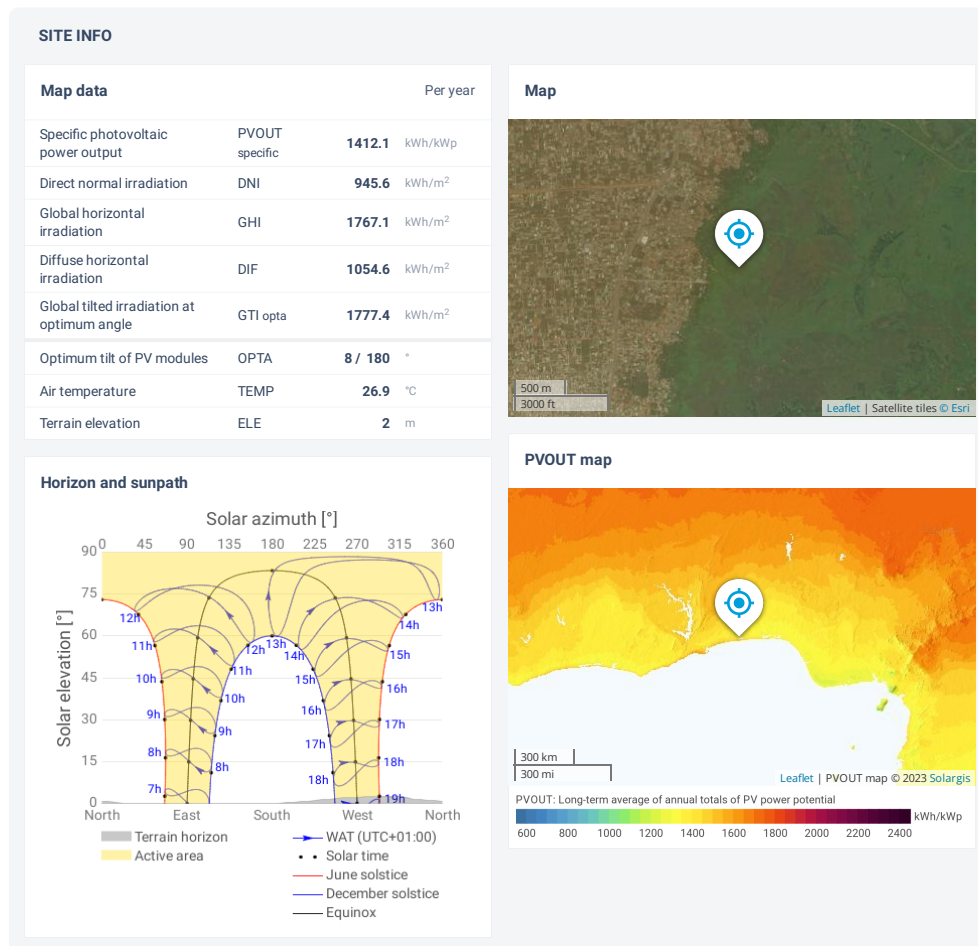


Figura 4.4: Informações sobre a irradiância global a Abomey Calavi no Benin. (Fonte: Global Solar ATLAS).

Horas	Índice de irradiação solar (kWh/dia/m ²)
06:00	0.031
07:00	0.095
08:00	0.326
09:00	0.525
10:00	0.819
11:00	0.848
12:00	0.785
13:00	0.638
14:00	0.420
15:00	0.210
16:00	0.098
17:00	0.046
18:00	0.0075
Total diária	4.847

Figura 4.5: Índice de irradiação solar em kWh/dia/m² a Abomey Calavi no Benin. (Fonte: Meteo-Benin.

Até aqui foi feito o dimensionamento parcial da usina fotovoltaica que será implementada na região sul do país e que terá o potencial de suprir cerca de 15% do consumo projetado até 2050. A viabilidade da implementação física e técnica será verificada no capítulo 4. Este consumo ajudará parcialmente a proporcionar um aumento significativo no consumo anual per capita da população além de todo o benefício ambiental que a geração de energia elétrica por fonte renovável pode oferecer ao meio ambiente e assim colocar o Benin na lista dos poucos países africanos no caminho da transição energética e da sustentabilidade. Vale lembrar que, embora o objetivo deste trabalho seja de certa forma propor uma matriz elétrica 100% renovável e susceptível de induzir um aumento significativo do consumo anual per capita em energia elétrica até o horizonte 2050, a ideia aqui não é de fazer um dimensionamento detalhado de cada usina geradora de energia com as diversas fontes de energia limpa que este trabalho inclui. Sendo assim, a seguir, vamos somente basear as nossas próximas propostas não somente no potencial dos demais fontes de energia limpa (a eólica⁴, a hidrelétrica e o uso da biomassa para a produção bionergia elétrica) mas também nos diversos projetos futuros que já foram repertoriados pelo governo beninense cujo detalhes ficarão em anexos no fim deste trabalho.

4.2.2 Hidrelétrica

A hidrelétrica mesmo se não apresenta um potencial tão forte quanto a solar, não deixa de ser totalmente aproveitável. Até o momento, vários locais viáveis para o desenvolvimento de usinas hidrelétricas foram identificados, sendo que dois deles já estão em operação. São eles:

1. Barragem de Nangbéto: localizada no rio Mono, com capacidade de 65MW e produção de energia de 150GWh. A barragem está situada no território do Togo, mas metade da produção é destinada ao Benin.

⁴Para esta fonte, ainda não há nenhum projeto do governo beninense para a exploração do seu potencial mas existem vários estudos que atestam da possibilidade da valorização deste tipo de fonte. O objetivo então não é fornecer uma descrição detalhada do dimensionamento da usina eólica, mas sim demonstrar a possibilidade de aproveitar o potencial eólico para estabelecer uma usina que gere uma quantidade significativa de energia ao longo do ano.

2. Mini usina de Yéripao: localizada no rio Kiatiko, possui capacidade de $0,5MW$ e produção de energia de $1,7GWh$. Essa usina atende a uma parte da cidade de Natitingou, localizada no noroeste do país.

Essas centrais hidrelétricas em funcionamento já contribuem para o suprimento de energia elétrica no Benin, fornecendo uma fonte renovável e sustentável de eletricidade para comunidades e áreas específicas do país.

Com um potencial hidrelétrico relativamente limitado devido à sua topografia predominantemente plana e à ausência de grandes rios, o Benin ainda pode explorar mais esse potencial hidrelétrico. A maioria dos rios no país é de porte médio a pequeno, o que dificulta o desenvolvimento de usinas hidrelétricas de grande escala. No entanto, existem algumas oportunidades para o aproveitamento de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) em certas regiões, especialmente nas áreas montanhosas do norte como indicado nas tabelas 3.9 e 3.8 que repertoriam os principais sites que possuem um certo potencial hidroelétrico aproveitável. De outro lado, o relatório do ECREEE and PÓYRY[88] aponta o potencial teórico de algumas sub-bacias existente no território beninense conforme na tabela 4.6 a seguir:


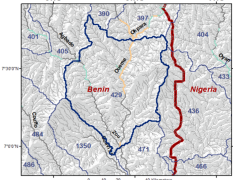
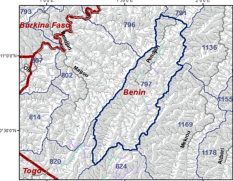
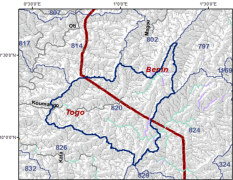

Sub Bacias	POTENCIAIS POR TIPO DE USINAS		INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES
	Potencial Hidrelétrico Teórico Dos rios na sub-bacia hidrográfica #397		Esta sub-bacia está localizada na trechos mais baixos do rio Okpara, que forma a fronteira com a Nigéria. Existe um considerável teor teórico potencial para pequenas HPP e UHE de médio/grande porte no rio Okpara e também no Rio Oueme no sul.
	Pico/micro/mini HPP	0 MW	
	HPP pequena	24,4 MW	
	HPP médio/grande	59,1 MW	
	Potencial Hidrelétrico Teórico Dos rios na sub-bacia hidrográfica #429		Esta sub-bacia hidrográfica do Rio Oueme também inclui o baixo trechos do rio Zou. Existe algum potencial teórico para pequenas HPP no rio Zou e para considerável potencial de média/grande HPP no rio Oueme.
	Pico/micro/mini HPP	0 MW	
	HPP pequena	6,3 MW	
	HPP médio/grande	65,5 MW	
	Potencial Hidrelétrico Teórico Dos rios na sub-bacia hidrográfica #797		Esta sub-bacia hidrográfica no norte de Benin forma a região da cabeceira do Pendjari Rivera. Existe algum potencial teórico para pico/micro/mini HPP e para pequena HPP. No entanto, a parte norte da sub-bacia hidrográfica encontra-se no Parc National de la Pendjari.
	Pico/micro/mini HPP	0,7 MW	
	HPP pequena	6,1 MW	
	HPP médio/grande	0 MW	
	Potencial Hidrelétrico Teórico Dos rios na sub-bacia hidrográfica #820		Esta sub-bacia hidrográfica do rio Koumango é partilhada com o Togo. Existe uma teoria considerável para o potencial de pico/micro/mini UHE e pequena UHE nos dois principais afluentes do rio Koumango (um deles está localizado no Togo).
	Pico/micro/mini HPP	1,8 MW	
	HPP pequena	28,2 MW	
	HPP médio/grande	0 MW	
	Potencial Hidrelétrico Teórico Dos rios na sub-bacia hidrográfica #824		Esta sub-bacia hidrográfica da nascente do Rio Koumango é partilhada com o Togo. Ele mostra um potencial teoricamente considerável para pico/micro/mini HPP e pequena HPP, mas partes do pequeno potencial HPP são encontradas na Floresta do Monte Amolo.
	Pico/micro/mini HPP	2,7 MW	
	HPP pequena	26,9 MW	
	HPP médio/grande	0 MW	

Figura 4.6: Potenciais teóricos das sub-bacias existente no Benin. (Fonte: GIS Hydropower Resource Mapping and Climate Change Scenarios for the ECOWAS Region.

As PCHs⁵ podem ser uma fonte de energia renovável significativa para comunidades locais e áreas rurais, fornecendo eletricidade de forma sustentável. Esses projetos menores podem aproveitar o fluxo de rios e riachos para gerar energia elétrica, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e contribuindo para a diversificação da matriz energética do país.

Considerando a distribuição feita na tabela 4.1, pode se calcular a energia total que é preciso gerar utilizando a hidrelétrica através da equação 4.9 a seguir:

$$E(hydro)_{diária} = \frac{E_{cons} \times 0.20}{365} \quad (4.9)$$

com: E_{cons} a energia total a ser gerada anualmente para atingir a meta de 3265 kWh/ano/habitante até o horizonte 2050 cujo cálculo foi expressa na equação 4.1. De acordo com a localização das sub bacias

⁵Pequenas Centrais Hidrelétricas. São usinas hidrelétricas de menor porte, que geralmente possuem capacidade instalada inferior a 30 megawatts (MW).

(Ver figura 3.9), a distribuição da geração da energia $E(hydro)_{diária}$ foi feita por região (Norte e Centro) conforme a tabela 4.3 a seguir:

Regiões	Proporção de energia a ser gerada (%)
Norte	60%
Centro	40%

Tabela 4.3: Distribuição da energia total a ser gerada por região (Norte e Centro) a partir da hidrelétrica. (Fonte: O autor)

Conforme apresentado na secção 3.3.2, de acordo com o relatório intitulado « *Proposition technico-économique de localités à électrifier par système d'énergie renouvelable* », ao reunir os diversos dados apresentados e considerando uma lista de 82 locais de micro-hidrelétricas com potência média inferior a 4,4 MW, identificados desde 2005, o potencial hidrelétrico no Benin pode oferecer uma produção garantida de 194 GWh/ano e uma potência a ser instalada de 64 MW, segundo uma cartografia em escala nacional dos locais de micro-hidroeletricidade por faixa de potência proposta pelo PNUD.

Esse produtivo anual de 194 GWh/ano apontado pela cartografia do PNUD, pode ser um ótimo ponto de partida para uma meta de geração a curto prazo para iniciar a transição energética.

Resumindo, embora o potencial hidrelétrico do Benin seja relativamente limitado devido à sua topografia plana e à ausência de grandes rios, ainda há oportunidades para o aproveitamento de pequenas centrais hidrelétricas em regiões montanhosas. Essas usinas podem desempenhar um papel significativo no fornecimento de energia renovável para comunidades locais em áreas rurais, contribuindo para a diversificação da matriz energética do país e reduzindo a dependência tanto de combustíveis fósseis quanto de importações dos países vizinhos. Embora o potencial hidrelétrico do Benin seja o segundo mais modesto em comparação com outras fontes de energia, como a solar e biomassa, a energia gerada por meio das PCHs pode contribuir para o objetivo de atingir uma meta de consumo de energia elétrica de 3265 kWh por ano por habitante até 2050. É importante explorar todas as fontes de energia disponíveis, incluindo a hidrelétrica, para alcançar um futuro energético sustentável e acessível para o país.

4.2.3 Energia eólica: Usina eólica Offshore e Onshore

Com base em todos os estudos que foram apresentados anteriormente e que atestam da existência de um certo potencial do eólico em terra beninense. Embora seja um potencial bem modesto em relação às demais fontes, o país pode aproveitar esse potencial para a implementação de usinas eólicas offshore (no alto mar) e onshore (em terra firme). Com uma faixa litorânea extensa e velocidades constantes de vento ao longo do ano, especialmente na região costeira, o país oferece condições favoráveis para o aproveitamento dessa fonte de energia renovável. Além disso, estudos preliminares indicam que a exploração do potencial eólico em áreas não turísticas ou não funcionais, pode contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor energético no Benin. A diversificação da matriz energética com usinas eólicas tanto em terra quanto no alto mar pode ajudar a atender à crescente demanda por energia elétrica no país, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover a sustentabilidade ambiental. Segundo um estudo realizado por (Maurel Richy e Al, 2018) sobre o Potencial Energético eólico Offshore do Bénin[89] e [10], o Benin possui um po-

tencial eólico não desprezível, especialmente nas regiões costeiras, na parte do noroeste (no departamento de Borgou, Alibori e Atacora) e em alto-mar (na Zona Econômica Exclusiva). À medida que a altitude aumenta, as velocidades do vento tendem a aumentar, ampliando ainda mais as oportunidades para a utilização desse recurso renovável. De outro lado, analisando a imagem da figura 3.16, é possível reparar que os departamentos do Littoral, Atlantique, Ouémé, Mono, Couffo e Zou representam as regiões de maior concentração de potencial eólico no sul. No norte, os ventos mais rápidos estão localizados em uma área com terreno muito acidentado. Os departamentos de Borgou e Alibori também apresentam velocidades médias de vento de $6m/s$.

Como foi explicitamente indicado na tabela 4.1, 5% da energia total a ser gerada para atingir a meta dos $3265 kWh/ano/habitante$ deve ser proveniente da fonte eólica. Sendo assim, a energia total a ser gerada por fonte eólica $E(eólica)_{cons/dia}$ será dada por:

$$E(eólica)_{cons/dia} = E_{cons/dia} \times 0,05 \quad (4.10)$$

Os resultados em [89] indicam que o potencial energético eólico na Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Benin a 80 m de altura atinge valores de até $774,0906 W/m^2$ em algumas áreas (ver figura 3.17).

Com os diversos potenciais registrados nos mais variados locais do país, convém fazer uma distribuição estratégica da energia a ser gerada diariamente pelo mix de potenciais usinas eólicas conforma a tabela 4.7 a seguir:

Tipo de usina eólica		Proporção de energia a ser gerada (%)
Offshore		60%
Onshore	zona costeira	10%
	Noroeste(Atakora, Alibori)	25%
	Centro e sul (Littoral, Atlantique, Ouémé, Mono, Couffo e Zou)	5%

Figura 4.7: Distribuição da energia a ser gerada por fonte eólica por tipo de usina eólica e por região. (Fonte: O autor.)

Da quantidade total de energia que será preciso gerar usando a energia eólica, cerca de 60% será gerada por meio de uma central eólica offshore que poderá ser implementado em alto mar visto que os estudos apontam um forte potencial em alto mar (próximo à latitude $3^{\circ}N$). De acordo com o padrão do NREL [20], esse potencial pode ser classificado na classe 5 ($670 W/m^2 \leq P \leq 820 W/m^2$). No entanto, em algumas partes da ZEE, ele atinge a classe 6 ($820 W/m^2 \leq P \leq 1160 W/m^2$). Tal quantidade de energia é dada pela expressão da equação 4.11:

$$E(eólica)_{Offshore} = E(eólica)_{cons/dia} \times 0,6 \quad (4.11)$$

Em relação ao Onshore, será feita uma distribuição da energia restante a ser gerada por locais com bom potencial eólico a saber:

- **Zona costeira Z_c :** com uma proporção de 10%

$$E(\text{eólica})_{Onshore(Z_c)} = E(\text{eólica})_{cons/dia} \times 0,1 \quad (4.12)$$

- **No noroeste nos departamentos de Atakora e Alibori:** com uma proporção de 25%

$$E(\text{eólica})_{Onshore(North)} = E(\text{eólica})_{cons/dia} \times 0,25 \quad (4.13)$$

- **e no centro e sul nos departamentos do Littoral, Atlantique, Ouémé, Mono, Couffo e Zou:** com uma proporção de apenas 5% pelo fato de ser regiões já fortemente habitados e portanto com pouca facilidade de implementação em razão do pouco espaço disponível.

$$E(\text{eólica})_{Onshore(SulCentro)} = E(\text{eólica})_{cons/dia} \times 0,05 \quad (4.14)$$

Um aspecto muito importante a levar em consideração é a questão do espaço disponível para implementação das usinas eólicas nos locais designados acima. É portanto de grande importância certificar que terá um espaço suficiente para possibilitar a implementação de tais usinas. Segundo [89], a zona costeira apresenta um potencial eólico que varia entre $769,6 \text{ W/m}^2$ e $949,2 \text{ W/m}^2$ o que corresponde a um potencial médio de $859,4 \text{ W/m}^2$ classificado na classe 6 segundo o NREL. Já no alto mar, esse potencial está entre $924,3 \text{ W/m}^2$ e $1233,5 \text{ W/m}^2$ a 120 m, e pode ser classificado na classe 7. No entanto, em algumas partes da ZEE, ele atinge a classe 6 ($820 \text{ W/m}^2 \leq P \leq 1160 \text{ W/m}^2$). Sendo assim, considerando que a zona costeira em questão possui aproximadamente um sétimo da área total do país(segundo [92]), Assim, considerando que somente a metade desta superfície é explorável para implementação de aerogeradores, temos então cerca de $8197,35 \text{ km}^2$. Desta forma, para gerar os 10% da energia elétrica total a ser gerada por fonte eólica na zona costeira, será preciso de uma superfície $Space_{z_c}$ dada por:

$$Space_{z_c} = \frac{Pot(\text{eólica})_{Onshore(Z_c)} \times 1 \text{ km}^2}{Potência \text{ gerável/dia (MW)}} \quad (4.15)$$

com:

- $Pot(\text{eólica})_{Onshore(Z_c)}$ a potência a ser gerada por dia pelos aerogeradores em MW na zona costeira. Essa potência é dada por:

$$Pot(\text{eólica})_{Onshore(Z_c)} = \frac{E(\text{eólica})_{Onshore(Z_c)}}{24h} \quad (4.16)$$

com:

- $E(\text{eólica})_{Onshore(Z_c)}$ em MWh/dia

Considerando a escolha do modelo (**1.5 MW Series**) de uma turbina eólica da General Electric de uma potência nominal ($Pot(nominal)_{turbina}$) de $1,5MW$ e com um diâmetro de $70.5m$ e um fator de capacidade típico de $0,35^6$, podemos calcular número de turbinas $N_{turbinas}$ que será necessário pela equação 4.17 dada por:

⁶Um fator de capacidade de 0,35 significa que apenas cerca de 35% da capacidade instalada da usina é de fato produtível

$$N_{turbinas} = \frac{Pot(eólica)_{Onshore}(Z_c) \times 0,35}{Pot(nominal)_{turbina}} \quad (4.17)$$

Óscar Alexis Monzón Alejandro, em seu projeto "Diseño de una Central de Generación Eólica de 20 MW", indica que a distância entre os aerogeradores na mesma fileira não deve ser menor do que o diâmetro de 2 rotores. Ele também afirma que a distância entre os aerogeradores em filas diferentes deve ser sempre maior do que 8 diâmetros. A razão para essas distâncias mínimas é a importância de minimizar o efeito de sombreamento de alguns aerogeradores sobre os outros. No próximo capítulo após calcular o número de turbinas que serão necessárias de fato, vamos discutir a respeito do espaçamento de cada aerogerador.

4.2.4 Bioenergia eletricidade a partir da biomassa e lixos orgânicos : Usina de transformação de lixos orgânicos em energia elétrica

Como foi descrito na seção explicativa do potencial da valorização de lixos orgânicos e resíduos agrícolas, para produção de energia elétrica, combinando diversas fontes de resíduos agrícolas nos departamentos de Borgou e Alibori, no Benin, é possível gerar aproximadamente 2000 GWh/ano de eletricidade, com uma capacidade instalada de mais de 300 MW. Um estudo realizado por Mensah et al.(2021)[83] abordou a geração de energia a partir do biogás em dez municípios do país, mostrando um ganho energético de 24,1 GWh/ano, com benefícios anuais estimados em 3 milhões de dólares. Essa quantidade de energia corresponde a 2,21% de toda a energia importada em 2016 e 1,82% em 2018, de acordo com dados da CIA (2016) e da Agência de Energia Renovável (ARE, 2018), respectivamente.

Um estudo realizado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) em 2010 revelou o potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos agrícolas no Benin. Com base nas taxas de crescimento da produção agrícola de 2007 e 2008, estima-se que mais de 2.700 GWh de energia elétrica possam ser gerados, utilizando apenas 20% desses resíduos. O departamento de Atlantique, localizado no sul do país, poderia contribuir com mais de 285 GWh/ano ao utilizar resíduos de óleo de palma, milho, arroz, castanha de caju, amendoim e pãoço. Além disso, os resíduos da produção de algodão, sendo o Benin um exportador de algodão na Comunidade Econômica dos Estados da África Ocidental (CEDEAO), podem ser aproveitados para a produção de gás e eletricidade, visando a autossuficiência energética do país. A produção de abacaxi e sorgo também poderia ser usada para produzir mais energia [10] (Yêhouenou, 2020). A conversão de resíduos domésticos em energia, como o biogás, também é uma opção viável. De acordo com o PNUD, utilizando dados de coleta de resíduos domésticos na cidade de Cotonou, cerca de 180.000 kg/dia de resíduos poderiam ser recuperados, contribuindo para a produção de biogás ou a instalação de uma usina de 5 MW na cidade (Yêhouenou, 2020). Considerando todo esse potencial citado acima, podemos confortavelmente esperar a geração de 40% da energia necessária a ser gerada anualmente para atingir até o horizonte 2050 um consumo anual per capita em energia elétrica por meios dos diversos projetos de valorização da biomassa elaborados e que esperam por financiamentos para serem executados. A lista destes projetos ficarão como apêndice no fim deste documento.

Essa quantidade de energia que representa os 40% da energia necessária a ser gerada anualmente para atingir até o horizonte 2050 um consumo anual per capita em energia elétrica de 3265 kWh/ano/habitante é dada por:

$$E(\text{bioenergia})_{\text{cons}/\text{dia}} = E_{\text{cons}/\text{dia}} \times 0,40 \quad (4.18)$$

4.3 PARA O SISTEMA FOTOVOLTAICO

Tendo como base a metodologia adotada neste trabalho, vamos neste capítulo, apresentar os diversos resultados obtidos.

Tendo como objetivo de induzir um consumo anual per capita em energia elétrica de cerca de 3265 kWh

Para se alcançar essa média mundial de consumo anual per capita M_{mundial} em termo de energia elétrica, o Benin teria que consumir anualmente uma quantidade de energia E_{cons} (ver equação 4.1) conforme lembrado aqui:

$$E_{\text{cons}} = 3265 \text{ kWh/ano/habitante} \times 13000000 \text{ habitantes} = 42445 \text{ GWh/ano}$$

portanto, diariamente teremos:

$$E_{\text{cons}/\text{dia}} = \frac{E_{\text{cons}}}{365} = \frac{42445 \text{ GWh/ano}}{365} = 116,29 \text{ GWh/dia}$$

Para a usina a ser implementada na região sul, teremos então uma energia diária a ser gerada dada por:

$$E(\text{solar})_{\text{cons}/\text{dia}} = E_{\text{cons}/\text{dia}} \times 0,35 \times 0,15 = 116,29 \text{ GWh/dia} \times 0,35 \times 0,15 = 6,105 \text{ GWh/dia}$$

Essa energia representa a 35% do consumo diário do Distrito Federal (17,22 GWh/dia)

Na figura 4.3 do capítulo 3, somando as potências representadas pela Áreas 1 e Área 3, obtemos E_{noturno} de cerca de 3,41407 GWh/dia de energia demandada no ciclo noturno.

A bateria escolhido segundo o datasheet, possui uma eficiência de 90% enquanto a eficiência do inversor é de 93%. Aqui não foi levado em consideração a eficiência do controlador de carga pois o modelo de inversor escolhido já vem com um controlador de carga embutido. Desta forma, a eficiência do sistema de armazenamento (83,7%) é obtida através da equação 4.6. Tal eficiência aplicada, corresponde a uma energia a ser armazenada E_{storage} de cerca de 3,84 GWh/dia.

$$\eta_{\text{storage}} = 98,8\% \times 90\% = 88,92\%$$

$$E_{\text{storage}} = \frac{3,41407}{88,92\%} = 3,84 \text{ GWh/dia}$$

A partir do que foi calculados acima podemos obter o valor da energia diária demandada a ser gerada pelo Sistema Fotovoltaico (cerca de 9,14699 GWh/dia) conforme a equação 2.4 aplicada abaixo:.

$$E_{demand} = E(solar)_{sul/dia} - E_{noturno} + E_{storage}$$

$$E_{demand} = 6,105 \text{ GWh/dia} - 3,41407 \text{ GWh/dia} + 3,84 \text{ GWh/dia} = 6,53 \text{ GWh/dia}$$

Essa energia demandada representa menos da metade da energia demandada a ser gerada pela SFV⁷ dimensionado pelo Marcelo em seu trabalho de conclusão de curso[91].

Considerando uma média de 6 horas de sol pleno diário (HSP), é necessário dimensionar a potência total dos módulos da planta fotovoltaica. Assim o fator de capacidade do sistema (FC_{solar}) é dada conforme equação 4.3.

$$HSP = \frac{4,847 \text{ kWh/m}^2}{1 \text{ kW/m}^2} = 4,847 \text{ horas}$$

$$FC_{solar} = \frac{HSP \times 100\%}{24h} = \frac{4,847h \times 100\%}{24h} \approx 20,19\%$$

A usina terá então um fator de capacidade de cerca de 20,19%.

Com as comparações feitas acima, pode se ver claramente que a usina a ser instalada na região sul do Benin e que suprirá 15% (6,53GWh/dia) levando em conta suas características elétricas (Potência, fator de capacidade e portanto porte).

Ao dimensionar a usina susceptível de suprir todo o consumo em energia elétrica do Distrito Federal, resultou se em uma necessidade de:

- cerca de 6488262 módulos fotovoltaicos distribuídos em 726 inversores.
- cerca de 325220 baterias e 104544 controladores de carga.

Essa usina dimensionada para o Distrito Federal terá uma potência instalada de cerca de 4,31 GWp e ocuparia cerca de 20,27 km^2 ou seja um quadrado de cerca de 4,9 km de lado com um custo total de R\$ 215,4 bilhões ou seja 1,009 $R\$/kWh$ e uma vida útil de 30 anos.

Já a usina a ser implementada a região sul do Benin teria uma potência total instalada de 0,254 GWp ou seja cerca de 6% da potência instalada da usina dimensionada para o Distrito Federal.

Visto isso, podemos afirmar que uma usina como a que vai suprir a demanda em energia elétrica da região sul do Benin, ocuparia bem menos de 20,27 km^2 de superfície. E pode-se afirmar que este espaço representa cerca de 0,6% do departamento de Atlantique onde possivelmente poderia ser implementada a usina. Quanto à viabilidade técnica, vale ressaltar que essa usina de tipo SFVCR será possível de implementar somente após aumentar a capacidade da infraestrutura da rede interligada da região.

⁷Sistema Fotovoltaico

Fazendo uma estimativa aproximada, podemos dizer que a usina a ser implantada na região sul do Benin, levando em consideração o custo total do sistema solar, Vida útil do sistema, os custos de manutenção e operação (15% do custo total) teria um custo de cerca de R\$ 0,511/*kWh*.

É importante ressaltar que essa é apenas uma estimativa aproximada com base na proporção da potência instalada entre as usinas. O custo final pode variar devido a diferentes fatores, como as condições específicas do local, custos de instalação, equipamentos e infraestrutura necessários, desafios encontrados para implantação entre outros. Portanto, uma análise mais detalhada e específica seria necessária para obter um valor mais preciso.

Para as outras usinas a serem implantadas nas regiões centrais e setentrional do país onde a taxa de eletrificação é relativamente baixa, recomenda-se que, antes da implementação das usinas solares de médio e grande porte nas regiões central e norte do Benin, seja dada prioridade à implementação das ações descritas no Plano Nacional de Eletrificação das Zonas Rurais. Isso permitirá que as novas áreas sejam eletrificadas com uma infraestrutura de distribuição de energia adequada, criando uma base sólida para a implantação gradual das usinas.

Dessa forma, é sugerido que sejam adotadas medidas prévias, em conformidade com o plano nacional, visando eletrificar as zonas rurais de maneira eficiente e abrangente. Essas medidas podem incluir a instalação de redes de distribuição de baixa tensão, a implementação de sistemas de microgeração distribuída e a promoção do acesso à energia renovável em comunidades remotas.

Ao estabelecer uma infraestrutura de distribuição confiável e eficiente nessas áreas, estaremos criando as condições necessárias para a posterior implantação das usinas solares de médio e grande porte. Essa abordagem garantirá que as novas áreas eletrificadas possam se beneficiar plenamente das usinas solares, maximizando o potencial de geração de energia renovável e contribuindo para a melhoria da qualidade de vida das comunidades locais.

No que diz respeito à viabilidade física da implementação, por serem regiões com menos população, o espaço físico necessário para implementação não seria um problema mas com a mesma ressalva feita para a usina do sul em relação à capacidade da infraestrutura da rede de conexão e/ou de distribuição.

Além da implementação desses sistemas de geração fotovoltaica, o ministério beninense da energia elaborou um relatório detalhado de cerca de 205 projetos de sistemas solar fotovoltaicas de médio e micro geração de 5 anos de operação cada totalisant uma quantidade de energia anual produtível de 2,17 *GWh* por um custo de R\$200.036.612,4.

Esse relatório se encontra como apêndice no fim deste documento

4.4 HIDRELÉTRICA

Para esta fonte de energia renovável, alocamos uma proporção relativamente baixa pois embora haja vários sites com potenciais, a maioria dele apresentam um potencial relativamente baixo. O que não permite esperar um grande aproveitamento da hidrelétrica. No entanto, existem algumas oportunidades para o aproveitamento de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) em certas regiões, especialmente nas áreas

montanhosas do norte como indicado nas tabelas 3.9 e 3.8 que repertoriam os principais sites que possuem um certo potencial hidroelétrico aproveitável.

Sendo assim, considerando a distribuição feita na tabela 4.1, pode se calcular a energia total que é preciso gerar utilizando a hidrelétrica através da equação 4.9 aplicada abaixo:

$$E(\text{hydro})_{\text{diária}} = E_{\text{cons}/\text{dia}} \times 0,20$$

$$E(\text{hydro})_{\text{diária}} = 116,29 \text{ GWh}/\text{dia} \times 0,20 = 23,258 \text{ GWh}/\text{dia}$$

Segundo um relatório redigido no âmbito do Atelier regional do CEREEC sobre a pequena central hidrelétrica organizado pela CEDEAO[93], na página 42 onde se aborda os projetos e perspectivas, o documento faz uma lista de alguns locais com potencial hidrelétrica com suas respectivas capacidades a serem instaladas e o produtivo anual garantido. Ao todo, são 7 locais totalizando uma capacidade instalada de cerca de 456,2 MW e um produtivo garantido de cerca de 1112 GWh/ano. Esse produtivo anual garantido é quase o consumo final em energia elétrica no país atualmente. Valorizar todos os locais que apresentam um potencial hidrelétrica ajudará o país na sua ambição de se tornar energeticamente autossuficiente e proporcionar um aumento do consumo per capita de eletricidade a nível nacional, melhorando a qualidade de vida da população.

O conjunto de usinas solares a serem implementadas susceptíveis de gerar os 23,258 GWh/dia, levando em consideração o custo total da implementação, o custo de manutenção e operação de 15% do custo total e uma vida útil de 30 anos, terá um custo de cerca de 1,19 R\$/kWh. Além disso, o ministério de energia elaborou um documento que repertoria 9 projetos de hidroeletricidade com 20 anos de operação cada com uma quantidade média de produtivo anual de cerca de 2,01 GW de potência com um custo de R\$16.269.691,60. Levando em consideração os custos de manutenção e operação representando 15% do custo total e uma vida útil de 20 anos, o custo total é de 0,021 R\$/kWh

4.5 EÓLICA

No capítulo anterior foi alocado uma proporção de 5% à geração de energia elétrica usando a eólica. Essa quantidade de energia $E(\text{eólica})_{\text{cons}/\text{dia}}$ pode ser calculada da seguinte forma:

$$E(\text{eólica})_{\text{cons}/\text{dia}} = E_{\text{cons}/\text{dia}} \times 0,05$$

$$E(\text{eólica})_{\text{cons}/\text{dia}} = 116,29 \text{ GWh}/\text{dia} \times 0,05 \approx 5,8145 \text{ GWh}/\text{dia}$$

Segundo a tabela 4.7 do Capítulo 3, dos 5% da energia total a ser gerada alocados à eólica, uma distribuição foi feita da forma seguinte:

Cerca de 40% da energia será gerada por meio de uma central eólica offshore, que será implementada em alto mar devido ao forte potencial identificado nessa região, especialmente próximo à latitude 3°N. A

quantidade de energia gerada pela central eólica offshore pode ser calculada usando a seguinte equação 4.11

$$E(\text{eólica})_{\text{Offshore}} = E(\text{eólica})_{\text{cons}/\text{dia}} \times 0,6$$

$$E(\text{eólica})_{\text{Offshore}} = 5,8145 \text{ GWh}/\text{dia} \times 0,4 \approx 2,326 \text{ GWh}/\text{dia}$$

Para a energia restante a ser gerada em terra (onshore), será feita uma distribuição em locais com bom potencial eólico, da seguinte forma:

Zona costeira (Z_c): 10% da energia restante será gerada nessa região, utilizando a equação 4.12:

$$E(\text{eólica})_{\text{Onshore}(Z_c)} = E(\text{eólica})_{\text{cons}/\text{dia}} \times 0,1$$

$$E(\text{eólica})_{\text{Onshore}(Z_c)} = 5,8145 \text{ GWh}/\text{dia} \times 0,1 \approx 0,58145 \text{ GWh}/\text{dia}$$

No noroeste nos departamentos de Atakora e Alibori: 45% da energia restante será gerada nessa região. Assim, temos:

$$E(\text{eólica})_{\text{Onshore}(North)} = E(\text{eólica})_{\text{cons}/\text{dia}} \times 0.45$$

$$E(\text{eólica})_{\text{Onshore}(North)} = 5,8145 \text{ GWh}/\text{dia} \times 0.45 \approx 2,616 \text{ GWh}/\text{dia}$$

No centro e sul nos departamentos do Littoral, Atlantique, Ouémé, Mono, Couffo e Zou: apenas 5% da energia restante será gerada nessas regiões, devido à densidade populacional já elevada e à disponibilidade limitada de espaço para implementação de projetos eólicos. A equação utilizada é:

$$E(\text{eólica})_{\text{Onshore}(SulCentro)} = E(\text{eólica})_{\text{cons}/\text{dia}} \times 0.05$$

$$E(\text{eólica})_{\text{Onshore}(SulCentro)} = 26,22 \text{ GWh}/\text{dia} \times 0.05 \approx 0,290 \text{ GWh}/\text{dia}$$

Essas proporções são utilizadas para determinar a quantidade de energia eólica a ser gerada offshore e onshore, levando em consideração o potencial eólico e as restrições geográficas da região.

Considerando que a zona costeira apresenta um potencial eólica que varia entre $769,6 \text{ W}/\text{m}^2$ e $949,2 \text{ W}/\text{m}^2$ o que corresponde a um potencial médio de $859,4 \text{ W}/\text{m}^2$, que a zona costeira em questão possui aproximadamente um sétimo da área total do país ($16394,7 \text{ km}^2$) e que somente a metade desta superfície é explorável para implementação de aerogeradores, temos então cerca de $8197,35 \text{ km}^2$ de disponível para implantação da usina eólica Offshore na zona costeira.

A potência $Pot(\text{eólica})_{\text{Onshore}(Z_c)}$ a ser gerada por dia pelos aerogeradores a serem instalados em MW na zona costeira dada por:

$$Pot(\text{eólica})_{\text{Onshore}(Z_c)} = \frac{E(\text{eólica})_{\text{Onshore}(Z_c)}}{24h}$$

$$Pot(eólica)_{Onshore(Z_c)} = \frac{581,45 \text{ MWh/dia}}{24h} \approx 24,22 \text{ MW}$$

com:

- $E(eólica)_{Onshore(Z_c)}$ em *MWh/dia*

Desta forma, para gerar os 10% da energia elétrica total a ser gerada por fonte eólica na zona costeira, será preciso de uma superfície $Space_{z_c}$ dada por:

$$Space_{z_c} = \frac{Pot(eólica)_{Onshore(Z_c)} \times 1 \text{ km}^2}{Potência \text{ gerável/dia (MW)}}$$

$$Space_{z_c} = \frac{24,22 \text{ MW} \times 1 \text{ km}^2}{859,4 \text{ MW}} \approx 0,0281 \text{ km}^2$$

com:

- $Pot(eólica)_{Onshore(Z_c)}$ a potência a ser gerada por dia pelos aerogeradores em MW na zona costeira.

Para calcular o número de turbinas necessárias, dado o modelo (**1.5 MW Series**) de turbina eólica da General Electric com uma potência nominal de 1,5MW, diâmetro de 70,5m e um fator de capacidade típico de 0,35, podemos usar a seguinte fórmula:

$$N_{turbinas} = \frac{Pot(eólica)_{Onshore(Z_c)} \times 0,35}{Pot(nominal)_{turbina}}$$

$$N_{turbinas} = \frac{24,22 \text{ MW} \times 0,35}{1,5 \text{ MW}} \approx 6 \text{ turbinas}$$

Conforme recomendado por Óscar Alexis Monzón Alejandro, a distância entre os aerogeradores na mesma fileira deve ser igual ou maior que o diâmetro de 2 rotores. Além disso, a distância entre aerogeradores em filas diferentes deve ser superior a 8 vezes o diâmetro dos rotores. Essas medidas são importantes para minimizar o impacto de sombreamento causado por um aerogerador sobre os demais. Sendo assim, considerando um arranjo de 8 fileiras de 9 aerogeradores com somente um aerogerador na nona fileira, será preciso de um espaço de aproximadamente 1,2 km por 5,5 km; o que corresponde a uma superfície de aproximadamente 6,6 km². Portanto, para implementar fisicamente a usina eólica na zona costeira, será preciso de menos de 1% da área disponível.

Para a usina a ser implementada no centro e sul do país, embora sejam regiões com relativamente poucos espaços disponíveis, podemos garantir de forma confortável que entre os 06 departamentos envolvidos nestas regiões, seria possível ter espaço suficiente para gerar os 5% de energia alocados.

Para a região setentrional nos departamentos de Atakora e Alibori onde 45% da energia será gerada com uma usina eólica, pode também se dar a garantia de que terá o espaço suficiente para implementar as usinas eólicas de forma a gerar tal quantidade de energia pois se tratar de departamentos da área rural, que são poucos habitados e portanto possuem muitas áreas ainda livres que poderiam ser usadas para tal implementação.

No que diz respeito à usina offshore em alto mar onde a grande maioria (40%) da energia será produzida, pelo fato do Benin possuir sua Zona Econômica Exclusiva⁸, pode se afirmar com grande confiança que o país pode explorar esse espaço para implementar sua usina eólica offshore usando turbinas de grande potência nominal como por exemplo o modelo (Gamesa SG 14-222 DD) da Siemens de 14 MW ou o modelo (Vestas V236-15.0 MW) da empresa Vestas; multinacional de energia eólica sediada na Dinamarca. Considerando que cerca de 3,4887 GWh/dia de energia serão gerada em alto mar, o que corresponde a uma potência diária gerada de 145,36 MW. Usando um aerogerador de 14 MW que custa aproximadamente 12,3 milhões de dólares. Será então preciso de 47 aerogeradores que custariam cerca de 135,3 milhões de dólares mais cerca 15% do custo total da implementação como custo de manutenção e operação com uma vida útil de 30 anos que resultaria em um custo de aproximadamente 0,0203 R\$/kWh. Vale ressaltar que há outras opções de aerogeradores mais baratas mas com desempenho menor.

4.6 BIOENERGIA ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA E LIXOS ORGÂNICOS

Segundo a distribuição de quantidade de energia a ser gerada por fonte na tabela 4.1, a quantidade de energia $E(\text{bioenergia})_{\text{cons}/\text{dia}}$ a ser gerada usando lixos urbanos e/ou lixos agrícolas representa 40% da energia necessária a ser gerada anualmente para atingir até o horizonte 2050 um consumo anual per capita em energia elétrica de 3265 kWh/ano/habitante. Tal quantidade de energia pode ser calculada da seguinte maneira:

$$E(\text{bioenergia})_{\text{cons}/\text{dia}} = E_{\text{cons}/\text{dia}} \times 0,40$$

$$E(\text{bioenergia})_{\text{cons}/\text{dia}} = 116,29 \text{ GWh/dia} \times 0,40 \approx 46,516 \text{ GWh/dia}$$

Com base nos estudos realizados entre 2017 e 2019, estima-se que o potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos agrícolas no Benin seja significativo. Levando em consideração o crescimento nas taxas de produção agrícola nos anos subsequentes, espera-se que seja possível gerar anualmente uma quantidade total de energia elétrica próxima de 2.700 GWh utilizando apenas 20% desses resíduos. Isso quer dizer que um aproveitamento de 80% de todos esses resíduos poderia resultar na geração anual de cerca de 10800 GWh; ou seja quase 8 vezes o consumo anual em eletricidade atual do país.

Dentre os diferentes departamentos e culturas agrícolas considerados, o departamento de Atlantique, localizado no sul do país, poderia contribuir com mais de 285 GWh/ano por meio do aproveitamento de resíduos de óleo de palma, milho, arroz, castanha de caju, amendoim e painço. Além disso, a utilização dos resíduos da produção de algodão, considerando que o Benin é um exportador de algodão na Comunidade Econômica dos Estados da África Ocidental (CEDEAO), poderia ser uma fonte adicional de gás e eletricidade para alcançar a autossuficiência energética do país.

Adicionalmente, a conversão de resíduos domésticos em energia, como o biogás, também é viável.

⁸Uma Zona Econômica Exclusiva (ZEE), de acordo com o direito do mar, é uma área marítima na qual um Estado costeiro exerce direitos soberanos e econômicos sobre a exploração e uso dos recursos naturais. Ela se estende a partir da linha de base do Estado até uma distância máxima de 200 milhas náuticas (370,42 km) de suas costas.

Estima-se que, com base em dados de coleta de resíduos domésticos na cidade de Cotonou, cerca de 180.000 kg/dia de resíduos poderiam ser recuperados, contribuindo para a produção de biogás ou a instalação de uma usina de 5 MW no mínimo na cidade ou até mais. Como pode se ver, na tabela 3.7, são produzidos muitos lixos nos centros urbanos e se levarmos em consideração o crescimento populacional até o horizonte 2050, a taxa de crescimento da produção de lixo poderia também aumentar significativamente e conseqüentemente o país poderá contar até 2050 com um potencial ainda maior para transformar seus lixos urbanos em energia elétrica para o consumo da população.

Considerando o potencial total mencionado acima, é possível projetar que até o horizonte de 2050, com o financiamento adequado para a implementação dos projetos de valorização da biomassa, a geração de energia a partir dessas fontes poderia representar aproximadamente 40% da energia necessária anualmente para atender ao consumo per capita de energia elétrica. É importante ressaltar que essas estimativas são baseadas em estudos e projeções realizados em 2019, levando em consideração o crescimento previsto nas taxas de produção agrícola.

Além disso, o ministério de energia do país elaborou um documento que detalha cerca de 10 projetos de exploração da biomassa para a produção de eletricidade. Esses 10 projetos produzirão em média cerca de 1,6 *GWh/ano* com um custo de cerca de R\$3.758.165,44 anual resultando em um custo de 0,337 R\$/*kWh*.

O Benin em 2016, consumiu 1072 *GWh* de energia (ver gráfico da figura 4.1). E segundo o site⁹ da "worldometers", nesse mesmo ano, o Benin emitiu cerca de 6,6 *Mt* (megatoneladas) de *CO*₂; isso corresponde a cerca de 6122,86 *t/GWh*. Sendo assim, com os 116,29 *GWh* de energia diária que serão gerada até o horizonte 2050, o Benin estaria deixando de emitir um equivalente de 712,03 *kt* de *CO*₂ diariamente.

É importante ressaltar que esse número é estimativas aproximadas e pode variar dependendo de vários fatores, como a capacidade de geração real, a eficiência das usinas e o perfil de consumo de energia. No entanto, a adoção de um mix de fontes de energia renováveis certamente teria um impacto positivo significativo na redução das emissões de *CO*₂ e na mitigação das mudanças climáticas.

4.7 CARTOGRAFIA DO MAPA DO BENIN ATÉ O HORIZONTE 2050

Levando em conta tudo o que precede, espera-se que o Benin até o ano 2050 tenha implantado um conjunto de usinas fotovoltaicas, eólicas(Onshore e Offshore), hidrelétricas e usinas de transformação de lixos urbanos e resíduos agrícolas como ilustra a Figura 4.8 a seguir:

⁹<https://www.worldometers.info/co2-emissions/co2-emissions-by-country/>

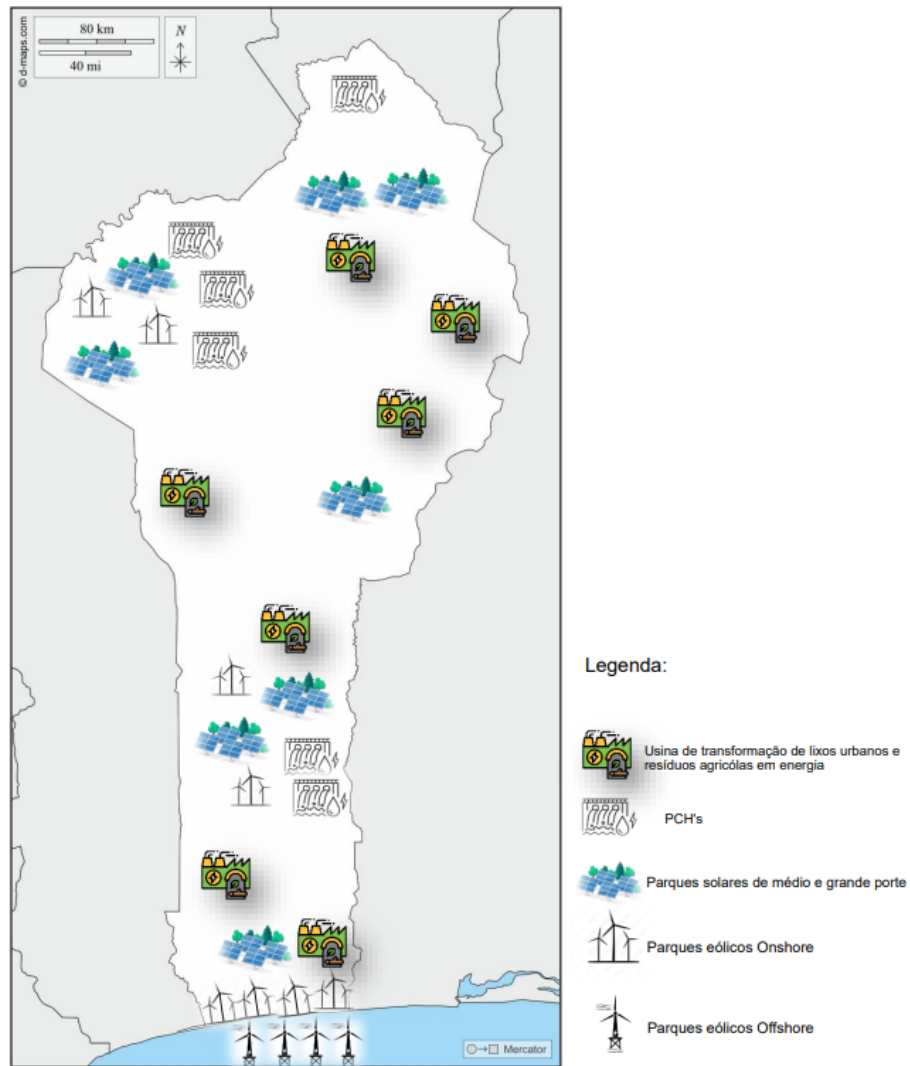


Figura 4.8: Mapa do Benin com o conjunto de usinas que serão implantadas até o horizonte 2050 (Fonte: O autor, 2023).

Importante lembrar que para não ter uma imagem muito poluída, essa cartografia não leva em consideração os projetos de mini-geração fotovoltaicas que poderiam ser realizados aproveitando os tetos dos prédios administrativos do país.

A proposta de aumentar o consumo anual per capita em energia elétrica no Benin de 120,6 kWh/ano para 3265 kWh/ano até o horizonte de 2050 é, sem dúvida, um projeto ambicioso. Essa meta representa uma expansão de cerca de 12% ao ano, o que demandaria esforços significativos e investimentos substanciais. No entanto, é importante reconhecer que, mesmo alcançar uma média de 1300 kWh/ano por habitante já seria um grande avanço para o país. Uma meta intermediária de 1300/kWh/ano/habitante seria mais realista e factível e ao mesmo tempo permitiria melhorar a qualidade de vida da população, ampliar o acesso a serviços básicos e estimular a geração de emprego, um grande desenvolvimento socioeconômico. Com mais energia disponível, as comunidades poderiam ter acesso a serviços básicos essenciais, como iluminação adequada, saúde, educação e infraestrutura moderna.

Fontes	Energia a ser gerada (GWh/ano)	Potência (GW/ano)
Solar PV	14856,047	1,695
Bioenergia	16978,34	1,938
Eólica	2122,29	0,242
Hidrelétrica	8489,17	0,969

Tabela 4.4: Tabela recapitulativa de cada fonte proposto e sua respectiva energia a ser gerada anualmente e potência - *Fonte: O autor*

Embora o projeto seja desafiador, é encorajador ver o comprometimento com a sustentabilidade e o desenvolvimento do país. Com planejamento adequado, cooperação internacional e investimentos estratégicos, é possível que o Benin dê passos significativos em direção a uma matriz energética renovável e a um aumento considerável no consumo per capita de energia elétrica. Essa transformação traria benefícios duradouros para as gerações presentes e futuras, colocando o Benin como um exemplo inspirador para outras nações em busca de um futuro mais sustentável e próspero.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um mix elétrico 100% renovável para o Benin, visando solucionar o problema de acesso limitado à energia enfrentado pela população e reduzir a dependência energética severa do país em relação aos países vizinhos. O estudo teve como objetivo induzir um aumento do consumo anual per capita de energia elétrica, levando-o de 120 kWh/habitante para a média mundial de 3265 kWh/habitante até o horizonte 2050.

Ao longo deste trabalho, foram realizadas análises criteriosas para identificar a quantidade total de energia necessária para atingir o aumento desejado no consumo per capita e avaliar o potencial de fontes renováveis, incluindo solar, eólica, biomassa e hidrelétrica. A distribuição proporcional da energia a ser gerada por cada fonte foi determinada, e unidades geradoras foram dimensionadas para atender à demanda de energia específica de cada fonte.

A viabilidade técnica e física da implementação de cada unidade geradora foi cuidadosamente examinada, identificando desafios técnicos, financeiros e institucionais. Foram propostas soluções para superar esses desafios, garantindo a viabilidade e a eficiência do mix elétrico renovável proposto.

O mix proposto permitira a geração de cerca de 119,26 *MWh/dia* em energia elétrica até o horizonte 2050. Com 35% gerada a partir da energia solar, 20% a partir da hidrelétrica, 5% a partir da eólica e 40% a partir da Biomassa, resíduos agrocolias e lixos urbanos.

Este estudo destacou a importância da transição para uma matriz elétrica 100% renovável para o Benin, promovendo desenvolvimento sustentável, acesso à energia e redução das desigualdades energéticas. Ao adotar fontes de energia limpa e renovável, o país poderá reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, mitigando os impactos das mudanças climáticas e contribuindo para um ambiente mais saudável e sustentável.

Além disso, a implementação do mix elétrico renovável proposto proporcionará maior segurança energética, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis importados e fortalecendo a autonomia energética do Benin. Isso também impulsionará o desenvolvimento econômico, criando empregos locais no setor de energia renovável e abrindo oportunidades para o país se tornar um exportador de energia limpa. Vale ressaltar que a transição para um mix elétrico 100% renovável não é isenta de desafios. É necessário enfrentar questões técnicas, financeiras e institucionais, mas o potencial de benefícios socioeconômicos, ambientais e de desenvolvimento a longo prazo justifica os esforços para sua implementação.

Portanto, a proposta deste trabalho contribui para um futuro sustentável e próspero para o Benin, fornecendo uma estratégia clara para a transição energética, impulsionando o aumento do consumo per capita de energia elétrica e garantindo um acesso mais equitativo à energia limpa e renovável.

Uma das principais medidas a serem tomadas é a ampliação progressiva da capacidade da rede interligada no país. Isso permitirá a integração e complementaridade entre as tecnologias renováveis propostas, como energia solar, eólica, biomassa e hidrelétrica. A melhoria das infraestruturas de transmissão e distribuição será essencial para garantir a eficiência e a confiabilidade do sistema elétrico renovável.

Ao alcançar uma matriz elétrica integralmente renovável, o Benin coloca-se em uma posição de destaque no cenário econômico e político global. Economicamente, o país se beneficiará da redução da dependência de combustíveis fósseis importados, o que diminuirá a volatilidade dos preços e fortalecerá a autonomia energética. Além disso, a transição energética impulsionará o desenvolvimento de um setor de energia renovável robusto, criando empregos locais e atraindo investimentos.

Do ponto de vista político, o Benin se tornará um exemplo e um líder no combate às mudanças climáticas e na mitigação dos efeitos nefastos das emissões de gases de efeito estufa provenientes de energias fósseis. Ao adotar uma matriz elétrica 100% renovável, o país demonstra seu compromisso com a sustentabilidade ambiental e a redução das emissões, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas em escala global. Além dos benefícios ambientais e políticos, a implementação do mix elétrico 100% renovável proposto trará uma série de impactos positivos para a população do Benin. Essa transição energética contribuirá para a melhoria da qualidade de vida da população, impulsionará o desenvolvimento econômico do país e atrairá investimentos externos.

Um dos principais impactos será a melhoria das condições socioeconômicas das comunidades, especialmente nas áreas rurais. Com um aumento significativo na taxa de eletrificação das áreas remotas, haverá acesso a energia limpa e confiável para residências, escolas, hospitais e empreendimentos locais. Isso proporcionará um ambiente propício para o desenvolvimento de atividades econômicas, como o crescimento do setor agrícola, a criação de pequenas indústrias e a promoção do empreendedorismo local.

A melhoria nas condições de vida também terá impactos sociais importantes. Com um maior acesso à eletricidade, as comunidades rurais terão melhores condições para o desenvolvimento de serviços básicos, como iluminação adequada, acesso à comunicação e oportunidades educacionais. Isso levará a um aumento no grau de alfabetização, pois mais crianças terão condições adequadas para estudar, reduzindo a evasão escolar e proporcionando um futuro mais promissor para as gerações futuras.

Essa transição também trará benefícios socioambientais significativos para o Benin. A redução das emissões de gases de efeito estufa resultantes da queima de combustíveis fósseis terá um impacto positivo na qualidade do ar e na saúde da população. Além disso, a utilização de fontes renováveis de energia contribuirá para a preservação dos recursos naturais, a proteção dos ecossistemas e a conservação da biodiversidade.

Importante lembrar que para alcançar com sucesso uma matriz elétrica totalmente renovável, será necessária uma forte colaboração entre governos, empresas, sociedade civil e organismos internacionais. Será preciso implementar políticas e regulamentações adequadas, incentivar o investimento em energia renovável, promover a educação e a conscientização sobre a importância da transição energética e superar os desafios técnicos e financeiros ao longo do caminho.

A implementação do mix elétrico renovável também fortalecerá a economia do Benin. A atração de investimentos externos no setor de energia renovável criará oportunidades de emprego, impulsionará o crescimento econômico e aumentará o Produto Interno Bruto (PIB) do país. Além disso, a redução da dependência de combustíveis fósseis importados levará a uma maior autonomia energética, reduzindo os gastos com importação e fortalecendo a balança comercial.

Esses avanços econômicos e sociais terão um impacto significativo na qualidade de vida da população,

melhorando as condições de saúde, educação e bem-estar. A energia limpa e acessível promoverá a inclusão social, reduzindo as desigualdades e proporcionando oportunidades iguais para todos os cidadãos.

Em resumo, a implementação do mix elétrico 100% renovável proposto para o Benin trará benefícios econômicos, sociais e ambientais para o país. Além de impulsionar o desenvolvimento sustentável, a transição energética melhorará a qualidade de vida da população, aumentará o acesso a serviços básicos, fortalecerá a economia e colocará o Benin como um país engajado na mitigação dos efeitos negativos das emissões de gases de efeito estufa provenientes de energias fósseis. Essa transformação energética é fundamental para garantir um futuro próspero, equitativo e sustentável para o povo beninense.

6 APÊNDICE

Neste [link](#) estão os relatórios dos projetos detalhados de **solar, biomassa e hidrelétrica** elaborados pelo Ministério da Energia do Benin:

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMODI, V. N. et al. The necessity of the development of standards for renewable energy technologies in nigeria. *Smart Grid and Renewable Energy*, Scientific Research Publishing, v. 5, n. 11, p. 259, 2014.
- [2] MENSAH, J. H. R.; SANTOS, I. F. S. dos; FILHO, G. L. T. A critical analysis of the energy situation in the benin republic and its evolution over the last decade. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 202, p. 634–650, 2023.
- [3] PLAN STRATEGIQUE DU MINISTERE DE L'ÉNERGIE 2020-2024. [S.l.]: MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE. <https://direction-energie.gouv.bj/documents/plan-strategique-du-ministere-de-lenergie-2020-2024-2.html>. Acesso em: 15 de abril de 2023.
- [4] STATISTICS report - Key World Energy, Statistics 2021. [S.l.]: IEA Africa. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>. Acesso em: 20 de abril de 2023.
- [5] CONSUMO total de energia. [S.l.]: EnerData. <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>. Acesso em: 10 de abril de 2023.
- [6] ULSRUD, K. Access to electricity for all and the role of decentralized solar power in sub-saharan africa. *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, Taylor & Francis, v. 74, n. 1, p. 54–63, 2020.
- [7] IEA. Africa energy outlook 2019. International Energy Agency, Paris , License: CC BY 4.0, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019>>.
- [8] AGENCY), I. I. E. Co2 emissions from fuel combustion. *Highlights*, 2019.
- [9] SINSIN, L. M. Economie de l'énergie et accès à l'électricité: trois essais sur le bénin. 2017.
- [10] YÊHOUÉNOU, K. G. M. *Transition énergétique au Bénin: quel apport du solaire photovoltaïque?* Tese (Doutorado) — Strasbourg, 2020.
- [11] CHIFFRES clés sur l'énergie au Bénin et dans l'espace UEMOA. https://www.ifdd.francophonie.org/wp-content/uploads/2021/09/Rapport-2019_SIE_UEMOA_Chiffres_Cles_BENIN_web.pdf. Acesso em: 15 de abril de 2023.
- [12] STATISTICS report - Key World Energy, Statistics 2021. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>. Acesso em: 19 de abril de 2023.
- [13] INFORMATIONS sur le Benin. [S.l.]: Wikipedia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9nin>. Acesso em: 28 de abril de 2023.

- [14] ENERGÉTICA, E. d. P. Matriz energética e elétrica. In: EPE. [S.l.], 2018.
- [15] EPE. Abcd energia, matriz energética e elétrica. *EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletricaELETRICA>*, 2021.
- [16] L'AUTORITE DE REGULATION DE L'ELECTRICITE (ARE), REGULATEUR DU BENIN Fiche pays n°5. http://www.regulae.fr/wp-content/uploads/2020/03/Fiche-rAl'gulateur-5_ARE-BAl'nin-2020-vf.pdf. Acesso em: 15 de abril de 2023.
- [17] CHIFFRES CLÉS 2021 BILANS ÉNERGÉTIQUES ET INDICATEURS 2016 A 2020. [S.l.]: Ministério de Energia - Direction Générale des Ressources Énergétiques - Benin. <https://direction-energie.gouv.bj/telecharger-chiffres-cles>. Acesso em: 21 de abril de 2023.
- [18] CHIFFRES CLÉS 2021 BILANS ÉNERGÉTIQUES ET INDICATEURS 2016 A 2020. [S.l.]: Ministério de Energia do Benin. <https://direction-energie.gouv.bj/documents/politique-nationale-de-developpement-des-energies-renouvelables-2020.html>. Acesso em: 21 de abril de 2023.
- [19] RAPPORT annuel 2015 et évolution 2010-2015. [S.l.]: Direction Générale de l'Energie (2017). Système d'Information Énergétique du Bénin. http://www.ecowrex.org/system/files/documents/2012_systeme-d-information-energetique-du-benin-sie-rapport-2010_direction-generale-de-l-energie.pdf. Acesso em: 03 de maio de 2023.
- [20] CO2 emissions of all world countries. [S.l.]: EDGAR - Emissions Database for Global Atmospheric Research. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022. Acesso em: 16 de abril de 2023.
- [21] TOLMASQUIM, M. T. et al. Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. *Rio de Janeiro: EPE*, v. 1, n. 1, p. 10, 2016.
- [22] ENTENDA TUDO SOBRE O FATOR DE CAPACIDADE. [S.l.]: Energes. <https://energes.com.br/fator-de-capacidade/>. Acesso em: 17 de abril de 2023.
- [23] DANTAS, E. M. et al. Um estudo do fator de capacidade em usinas eólicas. Universidade Federal de Campina Grande, 2013.
- [24] PEREIRA, E. et al. Atlas brasileiro de energia solar, 1a. edição. ed. *INPE, São José dos Campos*, 2006.
- [25] ELOKAN, P.-P. D. Énergie électrique et développement en afrique. *Recherches Internationales, Persée-Portail des revues scientifiques en SHS*, v. 121, n. 1, p. 61–82, 2021.
- [26] ENERGIA Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica. [S.l.]: GEPEA – Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. Acesso em: 21 de abril de 2023.

- [27] CRESESB. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. [S.l.]: Site CRESESB, 2014.
- [28] ABNT. *NBR-10899 - Energia Solar Fotovoltaica — Terminologia*. [S.l.: s.n.], 2013.
- [29] SILVA, M. S. da et al. Energia solar fotovoltaica: Revisão bibliográfica. *Revista Mythos*, v. 14, n. 2, p. 51–61, 2020.
- [30] USINA hidrelétrica: Da água à energia renovável: operação e tipos de usinas hidrelétricas. [S.l.]: Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-hidraulica/usina-hidreletrica>. Acesso em: 26 de abril de 2023.
- [31] HYDROELECTRICITY. [S.l.]: IEA (2022), IEA, Paris, License: CC BY 4.0. <https://www.iea.org/reports/hydroelectricity>. Acesso em: 21 de abril de 2023.
- [32] DEVELOPPEMENT DES PETITES CENTRALES HYDRO-ELECTRIQUES AU BENIN. [S.l.]: ECREEE. <http://www.ecreee.org/sites/default/files/benin.pdf>. Acesso em: 28 de abril de 2023.
- [33] ENERGIA hidrelétrica. [S.l.]: Brasil Escola Uol. <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/energia-hidreletrica.htm>. Acesso em: 21 de abril de 2023.
- [34] TODAS as vantagens da energia hidroelétrica. [S.l.]: Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-hidraulica/vantagensng-hub/energias-renoveveis/energia-hidraulica/usina-hidreletrica>. Acesso em: 26 de abril de 2023.
- [35] ENERGIA hidrelétrica. [S.l.]: Mundo Educação Uol. <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/energia-hidreletrica.htm>. Acesso em: 28 de abril de 2023.
- [36] ESTUDO do Potencial Eólico do Pontal do Abreu. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/87439/000907560.pdf>. Acesso em: 30 de abril de 2023.
- [37] GESTÃO de Projectos de Parques Eólicos. [S.l.]: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58820/1/000129627.pdf>. Acesso em: 01 de maio de 2023.
- [38] REIS, M. M. Sistema eólico de pequeno porte para interligação à rede elétrica. 2008.
- [39] SPECIAL report on renewable energy Sources and climate change Mitigation, 2011. [S.l.]: IPCC. http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf. Acesso em: 28 de abril de 2023.
- [40] RENEWABLES 2011 global Status report. [S.l.]: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2011. http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf. Acesso em: 30 de abril de 2023.

- [41] WIND Electricity. [S.l.]: IEA, Paris, License: CC BY 4.0. <https://www.iea.org/reports/wind-electricity>. Acesso em: 03 de maio de 2023.
- [42] MENTIS, D. et al. Assessing the technical wind energy potential in africa a gis-based approach. *Renewable Energy*, v. 83, p. 110–125, 2015. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115002633>>.
- [43] COUNCIL, G. W. E. Global wind energy council.[online] available at: http://gwec.net/wpcontent/uploads/2012/06.Annual_report_2011_lowres.pdf [Accessed 21 1 2013], 2011.
- [44] TONY JENKINS NICK, S. D. B. E. B. *The wind power, wind turbines and wind farms database*. [S.l.]: the wind power. http://www.thewindpower.net/statistics_world_en.php. Acesso em: 03 de maio de 2023.
- [45] ENERGIAS renováveis e agricultura, uma combinação possível. [S.l.]: Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/pt/historias/articles/2020/02/energias-renovaveis-agricultura-combinacao-possivel>. Acesso em: 19 de abril de 2023.
- [46] ENERGIA eólica Onshore. [S.l.]: Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-parques-eolicos-onshore>. Acesso em: 03 de maio de 2023.
- [47] ENERGIA eólica Offshore. [S.l.]: Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>. Acesso em: 03 de maio de 2023.
- [48] REBELO, C.; SILVA, L. Moinhos de vento do futuro. *Revista Rua Larga, Portugal, Universidade de Coimbra*, 2009.
- [49] HAU, E. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- [50] PICOLO, A. P.; RÜHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Sociedade Brasileira de Física, v. 36, n. 4, p. 01–13, Oct 2014. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000400007>>.
- [51] GARCÍA, F. H. Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos. 2004.
- [52] HOUEKPOHEHA, M. et al. Estimation de la puissance énergétique éolienne à partir de la distribution de weibull sur la côte béninoise à cotonou dans le golfe de guinée. *Journal of Renewable Energies*, v. 17, n. 3, p. 489–495, 2014.
- [53] KASBADJI, N. M.; MERZOUK, M. Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable application au pompage dans les hauts plateaux. *Revue des énergies renouvelables*, v. 9, n. 3, p. 155–163, 2006.
- [54] ŞEN, Z.; ALTUNKAYNAK, A.; ERDIK, T. Wind velocity vertical extrapolation by extended power law. *Advances in meteorology*, Hindawi, v. 2012, 2012.

- [55] FAIDA, H. et al. Etude et analyse des données du vent en vue de dimensionner un système de production d'énergie éolienne cas d'un site au nord du maroc. *Journal of Renewable Energies*, v. 13, n. 3, p. 477–483, 2010.
- [56] MUNGEKAR, A. et al. Intelligent control approach for fluid power transmission of a wind turbine system. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2019. v. 1276, n. 1, p. 012001.
- [57] VANTAGENS e desvantagens da energia eólica. [S.l.]: Portal Energia. <https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-da-energia-eolica/>. Acesso em: 03 de maio de 2023.
- [58] TODAS as vantagens da energia eólica. [S.l.]: Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-eolica/vantagens-energia-eolica>. Acesso em: 02 de maio de 2023.
- [59] BIOMASSA. [S.l.]: Brasil Escola Uol. <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/biomassa.htm>. Acesso em: 07 de maio de 2023.
- [60] BIOENERGIA. [S.l.]: Brasil Escola Uol. <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/bioenergia.htm>. Acesso em: 07 de maio de 2023.
- [61] TRANSFORMANDO resíduos em recursos: o caminho da energia gerada a partir de lixo. [S.l.]: 360 Engenharia. <https://engenharia360.com/geracao-de-energia-a-partir-de-lixo/>. Acesso em: 02 de maio de 2023.
- [62] NOTE d'orientation de politique - La bioénergie pour L'Afrique: opportunités, contraintes et compromis. [S.l.]: Nations Unies - Commission économique pour L'Afrique - Clim-Dev Afrique. <https://repository.uneca.org/bitstream/handle/10855/23431/b11580938.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 de maio de 2023.
- [63] DIAS, M. V. X. et al. Geração distribuída no brasil: oportunidades e barreiras. Universidade Federal de Itajubá, 2005.
- [64] INEE. O que É geração distribuída. *INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp*, 2022.
- [65] ARMAZENAMENTO ENERGÉTICO - Armazenamento de energia: a chave para um futuro descarbonizado. [S.l.]: Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/armazenamento-eficiente-de-energia>. Acesso em: 14 de maio de 2023.
- [66] EPE. Plano nacional de energia 2050. *EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Brasília*, 2020.
- [67] SANTOS, A. S. P. d. *Análise da evolução tecnológica na área de armazenamento de energia elétrica*. Tese (Doutorado), 2016.
- [68] SISTEMAS de armazenamento com baterias de lítio. [S.l.]: Enel - Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/armazenamento/baterias-de-litio>. Acesso em: 14 de maio de 2023.

- [69] CENTRAL HIDRELÉTRICA DE BOMBEAMENTO - Sabe para que servem as centrais hidrelétricas de bombeamento? [S.l.]: Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/central-hidreletrica-bombeamento>. Acesso em: 14 de maio de 2023.
- [70] CIMAUTOMAÇÃO. Supercapacitores: O que são e quais suas aplicações? *Disponível em:* <https://blog.cimautomacao.com.br/supercapacitores-o-que-sao-e-quais-suas-aplicacoes/>, 2022.
- [71] FRANCO, L. Supercapacitores – o que são e como são ensinados em sala de aula. *Disponível em:* <https://blog.liceufranco.com.br/supercapacitores-o-que-sao-e-como-sao-ensinados-em-sala-de-aula/>, 2022.
- [72] ALÉM do lítio: o armazenamento do futuro. [S.l.]: Enel - Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/armazenamento/alem-do-litio>. Acesso em: 14 de maio de 2023.
- [73] IEA (2019), The Future of Hydrogen. [S.l.]: IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. License: CC BY 4.0, Acesso em: 14 de maio de 2023.
- [74] HYDROGEN: A RENEWABLE ENERGY PERSPECTIVE. [S.l.]: IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf. Acesso em: 14 de maio de 2023.
- [75] A Enel Green Power se concentra no hidrogênio verde para acelerar a transição energética. [S.l.]: Enel - Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/pt/historias/articles/2020/07/hidrogenio-verde-futuro-energias-renovaveis>. Acesso em: 14 de maio de 2023.
- [76] ENGIE. Hidrogênio verde - saiba como o hidrogênio se transforma em combustível. *Disponível em:* <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/saiba-como-o-hidrogenio-se-transforma-em-combustivel>, 2022.
- [77] LE, F. S. Rapport d'étude de faisabilité sur le système de distribution. 2015.
- [78] L'INVESTISSEMENT, P. E. A. L. Analyse des contraintes a l'investissement prive et a la croissance economique au benin. 2012.
- [79] PLAN directeur de développement du sous-secteur de l'énergie électrique au Bénin. [S.l.]: IED. <https://direction-energie.gouv.bj/documents/plan-directeur-de-developpement-du-sous-secteur-de-lenergie-au-benin-resume-ex.html>. Acesso em: 15 de maio de 2023.
- [80] ANDERSEN, T. B.; DALGAARD, C.-J. Power outages and economic growth in africa. *Energy Economics*, Elsevier, v. 38, p. 19–23, 2013.
- [81] PNUD. Programme das nations unies pour le développement. identification et cartographie des potentialités et sources d'énergie renouvelables assorties des possibilités d'exploitation. rapport final. PNUD, 2010, 2010.

- [82] DPE. Dpe – direction de la promotion économique. déficit énergétique et compétitivité de l'Économie béninoise. rapport final. DPE, 2015, 2015.
- [83] MENSAH, J. H. R. et al. Assessment of electricity generation from biogas in benin from energy and economic viability perspectives. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 163, p. 613–624, 2021.
- [84] CIA. Central intelligence agency. the world factbook. CIA, 2016, 2016. Disponible em: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/bn.html>>.
- [85] ARE. République du Bénin. la production d'Énergie Électrique sur le plan national. Autorité de Régulation de l'Électricité, 2018, 2018. Disponible em: <<https://are.bj/laproduction/>>.
- [86] IRENA. Planification et perspectives pour les énergies renouvelables: Afrique de l'ouest. rapport final. International Renewable Energy Agency (2018), 2018.
- [87] POTENTIALITÉS et modalités d'exploitation des sources d'énergies renouvelables au Bénin. [S.l.]: PNUD. <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/bj/rapport-developper-benin-energies-renouvelables.pdf>. Accès em: 28 de abril de 2023.
- [88] GIS Hydropower Resource Mapping and Climate Change Scenarios for the ECOWAS Region. [S.l.]: ECREEE and PÓYRY. http://www.ecowrex.org/system/files/country_report_01_benin.pdf. Accès em: 28 de abril de 2023.
- [89] GNANDJI, M. R. et al. Etude du potentiel énergétique éolien offshore du Bénin. In: *Colloque International Francophone portant sur l'Énergétique et la Mécanique*. [S.l.: s.n.], 2018.
- [90] PLAN STRATÉGIQUE DU MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE 2020-2024: Assurer une transition énergétique pour le développement économique et social durable. [S.l.]: Ministère de L'Énergie , IFE Lab. <https://direction-energie.gouv.bj/documents/plan-strategique-du-ministere-de-lenergie-2020-2024-2.html>. Accès em: 30 de maio de 2023.
- [91] VIABILIDADE TÉCNICA DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA PARA O DISTRITO FEDERAL OBTENIR UMA MATRIZ ELÉTRICA 100% RENOVÁVEL ATÉ 2050. [S.l.]: Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, Autor: Marcelo Souza Gomes. https://unbbr-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/180011235_aluno_unb_br/EfNRG8LG7cJHgS4P4v0628oBctNp_6-9Z6zgYRw4eINY_g?e=QdhVvq. Accès em: 05 de junho de 2023.
- [92] PRUDENCIO, É. H.; SINGH, B.; ANDRÉ, P. Vulnérabilité de la zone côtière du Bénin à un rehaussement relatif du niveau marin: état de la question et préconisations/vulnerability of the coastal zone of benin to a relative sea level rise: State of the problem and recommendations. In: JSTOR. *Annales de géographie*. [S.l.], 2002. p. 25–40.
- [93] ATELIER REGIONAL DU CEREEC SUR LA PETITE CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE PETITE CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE ORGANISÉ PAR LA CEDEAO ORGANISÉ PAR LA CEDEAO: DEVELOPPEMENT DES PETITES CENTRALES HYDRO-ELECTRIQUES AU BENIN.

[S.l.]: ECREEE, UNIDO, ESMAP. <http://www.ecreee.org/sites/default/files/benin.pdf>. Acesso em: 30 de maio de 2023.